

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ІВІЦЬКА ДАР’Я КОСТЯНТИНІВНА

УДК 620.179.148:620.192

ДИСЕРТАЦІЯ
ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ
ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПІЇ МАТЕРІАЛІВ

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу
речовин

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Івіцька Д. К.

Науковий керівник – Баженов Віктор Григорович кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Івіцька Д.К. Вдосконалення електроємнісного методу контролю для дефектоскопії матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі удосконалення електроємнісного методу неруйнівного контролю матеріалів за рахунок розробки структур систем для підвищення чутливості сенсору та швидкодії приладу, дослідження параметрів та режимів роботи сенсору для забезпечення максимальної чутливості вимірювальної схеми, впливу геометричної форми та розмірів сенсору на його чутливість.

На даний час у світі має місце високий попит на композиційні матеріали зі спеціальними властивостями, такі як наномодифіковані інтелектуальні полімерні композиційні матеріали та вироби з них. Попит викликаний тим фактом, що високими темпами поширюється використання полімерних матеріалів з покращеними властивостями та матеріалів, що можуть реагувати на зміну умов експлуатації або попереджати про раптове виникнення аварійних ситуацій. Наномодифіковані інтелектуальні полімерні композиційні матеріали виготовляються з використанням наномодифікаторів на основі вуглецевих нанотрубок, сплавів з магнітними властивостями та різних типів датчиків, зокрема п'єзоелектричних, волоконно-оптичних тощо, які дозволяють контролювати дію зовнішніх факторів, зокрема, температури, деформацій, тиску тощо. Введення інтелектуальних датчиків у вироби з полімерних композиційних матеріалів дозволяє проводити дистанційну діагностику та моніторинг цих виробів в реальному часі під час їх експлуатації. Це актуально в таких сферах, як військово-промисловий комплекс, авіакосмічна

промисловість, медицина, суднобудування, автомобілебудування та машинобудування.

В роботі проведено огляд сучасного стану проблеми електричного неруйнівного контролю при виробництві наномодифікованих інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів з урахуванням необхідності точкового вимірювання діелектричної проникності матеріалу та контролю глибини занурення інтелектуальних датчиків у розплав полімерного матеріалу у реальному часі за можливості лише одностороннього доступу до об'єкту контролю.

Встановлено, що ультразвуковий метод неруйнівного контролю не повністю задовольняє поставленій задачі, так як дає змогу контролювати лише геометричні характеристики включень у виробі, але не може здійснювати контроль діелектричної проникності у локальній точці.

Електроємнісний метод є одним з найбільш універсальних та зручних для використання, за його допомогою можна вирішити значне коло задач дослідження. Проте, до цього часу електроємнісний метод застосовувався тільки для інтегральної оцінки параметрів об'єкту контролю. Використання методу для точкового контролю обмежено значним часом контролю, що обумовлено використанням мостових схем для вимірювання малих значень ємності з високою точністю. Це пояснюється тим, що такі схеми потребують багатоступеневих алгоритмів, що призводить до значного збільшення часу вимірювання. При скануванні об'єкту контролю в багатьох точках затрати часу стають неприпустимо великими. Крім того, для цього методу не існує аналітичних способів знаходження ємності для несиметричних сенсорів та сенсорів складної форми, що потребує використання комп'ютерних методів обчислення ємності. Також лишається не вирішеним остаточно питання боротьби з електромагнітними завадами.

Здійснено теоретичне обґрунтування електроємнісного методу та об'єкту контролю. Запропоновано метод вимірювання та критерії оцінки роботи

сенсора. Отримано рекомендації для визначення оптимальних параметрів роботи та мінімально можливі розміри сенсора для здійснення дефектоскопії.

Визначено оптимальні частоти для застосування методу та запропоновано метод визначення цих частот при зміні параметрів схеми. За допомогою моделювання визначено залежність ємності сенсора від характерного розміру електроду, що дозволило встановити мінімально можливу величину електрода, за якої можливо зафіксувати зміну ємності при контролі, що склала 6х6 мм.

Розроблено математичну модель процесу електроємнісного контролю дефектів у виробках на основі рівнянь Максвелла-Ампера. Математична модель була застосована до безрозмірних планарної 2D та 3D геометрій. Знайдено оптимальні параметри фізичної моделі.

Досліджено параметри процесу контролю та межі застосування методу для провідних та непровідних зразків, зокрема: товщина об'єкту контролю, робочий зазор, діелектрична проникність зразка. Для діелектричних зразків при проведенні контролю з заземленою підкладкою максимально можлива товщина об'єкту контролю, за якої можливе виявлення дефекту, становить $11H$, де H - відносна величина. При контролі без заземленої підкладки максимальна товщина об'єкту контролю є значно меншою та становить $5H$. Для провідних зразків, як показало моделювання, сенсор нечутливий до товщини. Максимальний робочий зазор при проведенні контролю діелектричного зразка, за якого можливе виявлення дефекту, становить $3H$. При контролі провідного зразка максимальний зазор становить $18H$. Вплив діелектричної проникності при проведенні контролю непровідних зразків різний, можна виділити три випадки: при $\epsilon < 5$ відсутність заземленої підкладки дозволяє отримати більш високу чутливість, ніж її наявність; при $5 < \epsilon < 6$ контроль можливий лише без заземленої підкладки, так як при наявності підкладки спостерігається зона нечутливості; при $\epsilon > 6$ наявність заземленої підкладки дозволяє отримати більш високу чутливість, ніж її відсутність. Здійснено моделювання контролю дефектів типу виступ, вузький та широкий жолоб.

Моделювання параметрів сенсора, а саме розподілу чутливості, дозволило порівняти сенсори різної геометричної форми та визначити оптимальні конструктивні параметри за критерієм чутливості. Запропоновано конструкцію ємнісного сенсора, яка забезпечує досягнення найвищої чутливості. Пропонований сенсор має на 50% більшу глибину контролю та на 63% більшу чутливість ніж зі стандартними сенсорами. Таким чином, пропонований сенсор поєднує у собі переваги досліджених раніше сенсорів та є найкращим для застосування у неруйнівному контролі.

Моделювання процесу контролю матеріалів зі змінними електропровідними властивостями, зокрема наномодифікованих полімерних композитів, підтвердило можливість застосування розробленого методу для такого класу матеріалів. Проведене дослідження продемонструвало певні обмеження щодо контролю дефектів у наномодифікованих полімерних матеріалах електроємнісним методом неруйнівного контролю. Зокрема, можливість виявляти дефекти на глибині залягання не більше 5Н при концентрації вуглецевих нанотрубок 1% мас. При цьому максимальний робочий зазор становить 0,33Н при концентраціях вуглецевих нанотрубок більше 5% мас. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні технологічних регламентів виробництва, а також при створенні комплексних пристроїв для неруйнівного контролю.

Також проведено моделювання процесу контролю глибини розташування інтелектуального датчика у матеріалі. Встановлено, що при глибині розташування інтелектуального датчика у поліетилен низького тиску більшій за 40Н, отримання сигналів з такого датчика є практично неможливим. Таким чином, збільшення граничної глибини розташування датчика для можливості здійснення контролю може досягатися або збільшенням характерних розмірів електродів, що не завжди можливо, або зміною діелектричної проникності полімерного матеріалу шляхом введення у полімерну матрицю модифікаторів які змінюють електричні властивості.

Розроблено спосіб підвищення завадостійкості, що дозволяє реєструвати з високою точністю зміну не тільки фазового зсуву вимірювального сигналу, але і зміну амплітуди вимірювального сигналу, що забезпечує підвищення точності вимірювання. На розроблений спосіб отримано патенти України на винахід.

Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили працездатність методу для розв'язання задач дефектоскопії. Розраховано похибку вимірювання амплітуди та фази сигналу, що є прийнятними для контролю.

Визначено апаратурну похибку, та здійснено моделювання у програмному комплексі MATLAB з метою визначення випадкової похибки при вимірюванні розробленою схемою. Зокрема встановлено, що похибка набуває найменших значень за початкового фазового зсуву сигналів 45° , при цьому доцільно використовувати 8-розрядні АЦП з частотою дискретизації не менше, ніж 1 Мвиб/с.

Ключові слова: електроємнісний неруйнівний контроль, ємнісний сенсор, діелектрична проникність, завадостійкість контролю.

ANNOTATION

Ivitska D. K. Improvement of the electric capacitance method of control for materials defectoscopy. - Manuscript.

Dissertation for scientific degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.11.13 " Devices and Methods for Testing and Materials Structure Determination" - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical task of improving the electroneutric method of non-destructive testing of materials through the development of systems structures for increasing the sensor sensitivity and speed of the device. It is also devoted for studying the parameters and operating modes of the sensor to ensure the maximum sensitivity of the measuring scheme, the influence of the geometric shape and dimensions of the sensor on its sensitivity.

All over the world there is a high demand for new composite materials, such as nanomodified intelligent polymer composite materials and products made from them. This is due to the fact that the use of polymeric materials that have improved properties and can react to changes in operating conditions or warn of the occurrence of emergency situations is being intensively spread. Nanomodified intelligent polymeric composite materials are manufactured using nanomodifiers, alloys with magnetic properties and various types of sensors, including fiber-optic and piezoelectric, etc., which allow to control the influence of external factors, in particular pressure, temperature, strain. Introduction of intelligent sensors into products made from polymer composite materials allows remote diagnostics and monitoring of these products directly during their operation. This is relevant in areas such as the military-industrial complex, aerospace industry, medicine, shipbuilding, automotive and mechanical engineering.

In this work it was make an overview of the problem of electrical non-destructive testing in the manufacture of nanomodified intelligent polymer composite materials, taking into account the need for point measurement of dielectric material

permeability and control of the depth of intelligent sensors introduction in the melt of polymer material in real time with the possibility of only one-way access to the object of control.

It is established that the ultrasonic method of non-destructive testing does not completely satisfy the task, since it allows to control only the geometric characteristics of the inclusions in the product, but can not control the permittivity at the local point.

The electric capacitance method is one of the most versatile and easy to use. By this method it is possible to solve a significant range of research tasks. However, by this time, the electric capacitance method was used only for the integral evaluation of the parameters of the object of control. Using the method for point control is limited by a significant control time, which is due to the use of Wheatstone bridge schemes for measuring small capacitance values with high accuracy. This is explained by the fact that such schemes require multi-step algorithms, which leads to a significant increase in the measurement time. When scanning object of control in many points the time consuming becomes unacceptably large. Besides, for this method there are no analytical methods for finding capacitance of the asymmetric sensors and sensors of complex form requiring the use of computer methods for calculating capacitance. Also, the issue of combating electromagnetic interference is still unresolved.

The theoretical substantiation of the electric capacitance method and object of control is carried out. The method of measurement and criteria for estimating the sensor operation is proposed. The recommendations for determining an optimal parameters of the work and minimum possible dimensions of the sensor for the implementation of the defectoscopy are obtained.

The optimal frequencies are determined for the application of the method and a method for determining these frequencies when changing the parameters of the scheme is proposed. With the help of simulation, the dependence of the sensor capacity on the characteristic size of the electrode was determined, which allowed

setting the minimum possible value of the electrode, which is may be measuring the change in capacitance, that was 6x6 mm.

The mathematical model of the electric capacitance control process of defects in products is developed on the basis of Maxwell-Ampere equations. The mathematical model was applied to dimensionless geometries (planar 2D and 3D). It was finding the optimal parameters of the physical model.

It was investigated the parameters of control process and the limits of method application for conducting and non-conducting samples, in particular: thickness of the control object, working gap, relative permittivity of the sample. For dielectric samples, when testing with a grounded pad, the maximum possible thickness of the test object at which a defect can be detected is $11H$, where H is a relative value. When testing without a grounded substrate, the maximum thickness of the test object is much smaller and amounts to $5H$. For conductive samples, as shown by the simulation, the sensor is not sensitive to thickness. The maximum working gap when conducting control of a dielectric sample, at which a defect can be detected, is $3H$. When monitoring a conductive sample, the maximum gap is $18H$. The effect of the relative permittivity during the testing of non-conductive samples is different, three cases can be distinguished: with $\varepsilon < 5$ the absence of a grounded substrate allows one to obtain a higher sensitivity than its presence; at $5 < \varepsilon < 6$ control is possible only without a grounded substrate, since in the presence of the substrate, a dead zone is observed; when $\varepsilon > 6$ the presence of a grounded substrate allows to obtain a higher sensitivity than its absence. Modeling of defect control such as the protrusion, narrow and wide trench is carried out.

Simulation of sensor parameters, namely the distribution of sensitivity, allowed to compare sensors of different geometric shapes and to determine the optimal design parameters for the sensitivity criterion. The design of the capacitive sensor is proposed, which ensures achievement of the highest sensitivity. The proposed sensor has a 50% greater control depth and 63% greater sensitivity than with standard

sensors. Thus, the proposed sensor combines the advantages of previously studied sensors and is best for use in nondestructive testing.

Simulation of the control process with variable conductive properties in particular nano-modified polymer composites, confirmed the possibility of using the developed method for such a class of materials. The study demonstrated certain limitations on the control of defects in nanomodified polymer materials by the electrical capacitance method of nondestructive testing. In particular, to detect defects at a depth of not more than $5H$ at a concentration of carbon nanotubes of 1% by weight. And the maximum working gap is $0.33H$ at concentrations of carbon nanotubes of more than 5% by weight. The results of the study can be used in the design of technological regulations of production, as well as the creation of integrated devices for non-destructive testing.

Also, the process of monitoring the depth of the intelligent sensor location in the material was modeled. It has been established that when the depth of the intelligent sensor is located in low-pressure polyethylene exceeding $40H$, it is practically impossible to receive signals from such a sensor. Thus, an increase in the maximum depth of the sensor for control can be achieved either by increasing the characteristic dimensions of the electrodes, which is not always possible, or by changing the dielectric constant of the polymeric material by introducing modifiers into the polymer matrix that change the electrical properties.

The method of increasing noise immunity is developed, which allows to register with high accuracy the change not only of the phase shift of the measuring signal, but also the change in the amplitude of the measuring signal, which provides an increase in the accuracy of the measurement. On the developed method were obtained the Ukrainian patents for the invention.

Experimental studies have been carried out, which confirmed the efficiency of the method for solving defectoscopy problems. The measurement error of the amplitude and phase of the signal, which is acceptable for control, is calculated.

The hardware error has been determined, and the simulation in the MATLAB software complex has been carried out in order to determine the random error when measuring the developed scheme. In particular, it was found that the error acquires the lowest values for the initial phase shift of the signals 45° , while it is advisable to use 8-bit ADCs with a sampling frequency of at least 1 MSa/s.

Key words: electric capacitance non-destructive control, capacitive sensor, dielectric permittivity, noise immunity of control.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Баженов В. Г. Удосконалений електростатичний метод неруйнівного контролю / В. Г. Баженов, Д. К. Івіцька, С. В. Грузін // Методи та прилади контролю якості. — 2013. — №2(31). — С. 26—28.

Здобувачем проведено моделювання методу в середовищі COMSOL Multiphysics.

2. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material / I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol. 1. — №5(85). — Р. 4—9. (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

Здобувачем проведено математичне моделювання контролю глибини введення інтелектуальних датчиків.

3. Simulation of nanomodified polymers testing by the electric capacitive method / V. Bazhenov, A. Protasov, I. Ivitskiy, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol. 4. — №5(88). — Р. 4—9. (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

Здобувачем проведено математичне моделювання контролю дефектів у наномодифікованих полімерних матеріалах.

4. Баженов В. Г. Експериментальне дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів у полімерних матеріалах / В. Г. Баженов, І. І. Івіцький, Д. К. Івіцька // Вісник НТУ «ХП». — 2017. — №16. — С. 34—39.

Здобувачем здійснено експериментальні дослідження.

5. Пат. на винахід 107893 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201315068; заявл. 23.12.13; опубл. 25.02.15, Бюл. №4.

Здобувачем запропоновано визначати вимірювальний сигнал як різницю вихідних сигналів двох пар електродів.

6. Пат. на винахід 109357 Україна, МПК G 01 B 7/00, G 01 N 27/22. Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201404947; заявл. 12.05.14; опубл. 10.08.15, Бюл. №15.

Здобувачем запропоновано одночасне виконання перемноження вимірювального сигналу з двома складовими ортогонального опорного сигналу.

7. Пат. на винахід 112917 Україна, МПК G 01 B 7/00, G 01 B 7/287, G 01 N 27/22. Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №a201502540; заявл. 20.03.15; опубл. 10.11.16, Бюл. №21.

Здобувачем запропоновано визначення значення фазового зсуву в кожній точці контролю по коду зміни початкової фази опорного сигналу, при якому буде мінімум амплітуди постійної складової.

8. Пат. на корисну модель 90117 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201315066; заявл. 23.12.13; опубл. 12.05.14, Бюл. №9.

Здобувачем запропоновано визначати вимірювальний сигнал як різницю вихідних сигналів однієї та другої пар електродів.

9. Пат. на корисну модель 93032 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201404948; заявл. 12.05.14; опубл. 10.09.14, Бюл. №17.

Здобувачем запропоновано одночасне виконання перемноження вимірювального сигналу з двома складовими ортогонального опорного сигналу.

10. Пат. на корисну модель 101625 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201502542; заявл. 20.03.15; опубл. 25.09.15, Бюл. №18.

Здобувачем запропоновано визначення значення фазового зсуву в кожній точці контролю по коду зміни початкової фази опорного сигналу, при якому буде мінімум амплітуди постійної складової.

11. Івіцька Д. К. Розробка електростатичного методу неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю / Д. К. Івіцька // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — №3(19). — С. 44—47. (входить до міжнародних наукометричних баз «Index Copernicus», «РИНЦ», «Ulrich's Periodicals Directory», «DRIVER», «BASE», «ResearchBib», «DOAJ», «WorldCat»).

12. Bazhenov V. G. Mathematical Model Electro Capacitive Methods of Nondestructive Testing / V. G. Bazhenov, I. I. Ivitskiy, D. K. Ivitska // SWorld Journal. — 2017. — Issue 13. — P. 185—189.

Здобувачем обґрунтовано застосування математичної моделі.

13. Електростатичний метод неруйнівного контролю матеріалів / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов // Матеріали IV науково-практичної конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. — С. 60—61.

Здобувачем обґрунтовано доцільність використання методу для контролю промислового обладнання.

14. Первичные преобразователи для реализации электростатического метода неразрушающего контроля изделий / В.Г.Баженов, Д. К. Ивицкая // Материалы 8-й Международной научно-технической конференции “Приборостроение - 2015”. – 2015. – С. 47 - 48.

Здобувачем розраховані чутливості метода для різних типів дефектів.

15. Електростатичний амплітудно-фазовий метод неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю / В.Г. Баженов, Д.К. Івіцька // Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції та виставки “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. – Київ, 2016.

Здобувачем доведено підвищення завадостійкості при використанні методу.

16. Комп’ютерне моделювання ємнісного давача для неруйнівного контролю / Д.К. Івіцька, В.Г. Баженов // Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем». — 2016. — С. 35—38.

Здобувачем проведено комп’ютерне моделювання.

17. Моделювання ємнісного давача складної форми / В.Г. Баженов, Д.К. Івіцька // Матеріали 3-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції “Актуальні проблеми автоматики та приладобудування”. – 2016. – С. 92—93.

Здобувачем проведено комп’ютерне моделювання.

18. Аналіз електростатичного методу неруйнівного контролю для різних типів структур матеріалів / Д.К. Івіцька, В.Г. Баженов // Матеріали 5-ї науково-технічної конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій”. – 2016. – С. 210 – 211.

Здобувачем обґрунтовано можливість контролю матеріалів різної структури.

19. Контроль товщини пакувальної плівки електростатичним методом / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов, І. І. Івіцький // Матеріали доповідей XVI Науково-практичної конференції молодих вчених «Новітні технології пакування». — К.: НУХТ, 2017. — С. 7—9.

Здобувачем обґрунтовано необхідність застосування методу при контролі товщини плівки.

20. Електростатичний контроль глибини введення металевих елементів у діелектричні матеріали / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». — Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2017. — С. 87—88.

Здобувачем отримано розподіли електричного поля для різної глибини введення металевих елементів.

21. Transducers for realization of the electrostatic method of non-destructive testing of functional polymers / V. Bazhenov, D. Ivitska, I. I. Ivitskiy // NDT DAYS 2017. — Sozopol, 2017. — P. 128—129.

Здобувачем проведено математичне моделювання сенсорів різної форми.

22. Особливості реалізації електростатичного амплітудно-фазового способу неруйнівного контролю / В. Г. Баженов, Д. К. Івіцька // Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”. – Київ: НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. – С. 135.

Здобувачем запропоновано реалізацію амплітудно-фазового способу неруйнівного контролю.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ НАНОМОДИФІКОВАНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	29
1.1 Сучасні наномодифіковані інтелектуальні полімерні композиційні матеріали	29
1.2 Особливості виготовлення наномодифікованих інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів.....	34
1.3 Огляд методів для контролю наномодифікованих інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів	36
1.3.1 Ультразвукові методи неруйнівного контролю	37
1.3.2 Електричні методи неруйнівного контролю	38
1.4 Електроємнісний метод неруйнівного контролю	41
1.5 Аналіз публікацій застосування електроємнісного методу неруйнівного контролю	48
1.6 Мета і завдання дисертаційної роботи.....	50
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ	52
2.1 Теоретичні положення	52
2.2 Властивості об'єкта контролю	54
2.3 Мостові методи вимірювання ємності	56
2.4 Критерії оцінки роботи сенсора.....	60
2.5 Основні схеми діагностики об'єкта контролю при застосуванні електроємнісного методу	61

2.5.1	Непровідний об'єкт контролю	61
2.5.2	Непровідний об'єкт контролю із заземленою підкладкою	62
2.5.3	Провідний об'єкт контролю	63
2.6	Еквівалентна схема вимірювання	64
2.7	Визначення чутливості вимірювальної схеми.....	73
	Висновки до розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ МАТЕРІАЛІВ		78
3.1	Математична модель ємнісного сенсору	78
3.2	Аналіз впливу патаметрів системи «об'єкт контролю-сенсор» на результат контролю	81
3.2.1	Вплив товщини об'єкта на процес контролю.....	83
3.2.2	Вплив робочого зазору на процес контролю.....	85
3.2.3	Вплив значень діелектричної проникності.....	86
3.3	Моделювання процесу виявлення різних типів дефектів	88
3.3.1	Дефект типу виступ.....	88
3.3.2	Дефект типу широкий жолоб	90
3.3.3	Дефект типу вузький жолоб	92
3.4	Обґрунтування конфігурації електродів ємнісного сенсора.....	94
3.4.1	Метод збудження	96
3.4.2	Математична модель розподілу чутливості	98
3.4.3	Розподіл чутливості сенсорів.....	103
3.5	Моделювання матеріалів зі змінними електропровідними властивостями	113

3.6	Моделювання процесу контролю глибини розташування інтелектуального датчика	119
	Висновки до розділу 3.....	125
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСМНІСНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ		
4.1	Лабораторна установка	128
4.2	Аналіз впливу електромагнітних завад на результати вимірювання сигналу	133
4.3	Реалізація підвищення завадостійкості сенсорів	135
4.4	Оцінка впливу похибок.....	142
4.4.1	Методика розрахунку похибок прямих вимірювань	142
4.4.2	Розрахунок похибки вимірювання напруги	143
4.4.3	Розрахунок похибки вимірювання фази	145
4.5	Розрахунок похибки вимірювальної схеми	146
	Висновки до розділу 4.....	151
	ВИСНОВКИ.....	152
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	154
	ДОДАТОК А	170
	ДОДАТОК Б.....	172
	ДОДАТОК В	177

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

B – магнітна індукція, Тл;

C – ємність, Ф;

D – електрична індукція, Кл/м²;

E – напруженість поля, В/м;

H – напруженість магнітного поля, А·в/м;

V – напруга, В;

J – густина струму, А/м²;

ε – відносна електрична проникність;

μ – відносна магнітна проникність;

ρ – густина заряду, Кл/м³;

σ – електропровідність матеріалу, См/м

НК – неруйнівний контроль

ОК – об'єкт контролю

ІД – інтелектуальний датчик

ВНТ – вуглецеві нанотрубки

ПКМ – полімерний композиційний матеріал

НМІПКМ – наномодифікований інтелектуальний ПКМ

ВСТУП

Актуальність теми. У всьому світі протягом останніх десятирічь спостерігається високий попит на новітні композиційні матеріали, перш за все, на інноваційні полімерні композиційні матеріали (ПКМ), зокрема, на наномодифіковані інтелектуальні ПКМ (НМІПКМ) та вироби з них. Це обумовлено тим, що інтенсивно поширюються як використання полімерних матеріалів, так і пластмасових виробів з них, особливо тих, що мають покращені властивості та можуть реагувати на зміну умов експлуатації або попереджати про виникнення аварійних ситуацій, тобто т. зв. інтелектуальних полімерних виробів [1].

Наномодифіковані інтелектуальні ПКМ виготовляються з використанням наномодифікаторів, сплавів з магнітними властивостями та різних типів датчиків, зокрема волоконно-оптичних і п'єзоелектричних тощо, які дозволяють контролювати дію зовнішніх факторів, зокрема, тиску, температури, деформацій тощо. Введення інтелектуальних датчиків у вироби з полімерних композиційних матеріалів дозволяє здійснювати дистанційну діагностику та моніторинг цих виробів в реальному часі під час їх експлуатації. Це актуально в таких сферах, як [2-8]:

- авіакосмічна промисловість (контроль напружено-деформованого стану елементів та вузлів літальних апаратів);
- медицина (контроль елементів штучних суглобів, клапанів серця, тощо);
- суднобудування (контроль зносу найбільш відповідальних елементів суден та підводних човнів);
- автомобілебудування та машинобудування (контроль напружень, які виникають під час експлуатації у відповідальних місцях).

У даний час проводяться інтенсивні наукові дослідження в напрямках створення технологій та устаткування для виробництва НМІПКМ, зокрема, на

базі експериментальних і числових методів та моделювання цих процесів. Серед них – такі вчені як Уорден К., Фан-Тьєн Н., Грімак Н., Таннер Р. (США), Петерс Й. (Німеччина), Михайлін Ю. А., Тимошков П.М., Соколов І.І., Коган Д.І., Попов Ю.О., Каблов Є.М. (Росія), С.М. Песецький (Білорусь) та інші.

При виготовленні виробів з НМІПКМ виникають ряд проблем, пов'язаних перш за все з тим, що такі матеріали змінюють діелектричну проникність та провідність в залежності від концентрації наповнювача, в якості якого використовуються вуглецеві нанотрубки (ВНТ) [7]. ВНТ відіграють роль модифікатора полімерної матриці, який значно покращує фізико-механічні характеристики виробу, зокрема міцність, жорсткість та зносостійкість. Найбільш актуальними проблемами при виробництві НМІПКМ є:

1. Необхідність точкового вимірювання діелектричної проникності матеріалу у режимі реального часу для контролю рівномірності розподілення ВНТ у полімерній матриці. Незважаючи на використання сучасних змішувачів та гомогенізаторів ВНТ мають схильність до утворення агломератів, які призводять до значного погіршення властивостей виробу та неможливості його використання. В зв'язку з цим необхідно під час виробничого процесу здійснювати контроль рівномірності розподілу ВНТ через точкове вимірювання діелектричної проникності.

2. Необхідність контролю глибини розташування інтелектуальних датчиків (ІД) у розплав полімерного матеріалу у реальному часі для можливості коригування технологічних параметрів переробного обладнання [8]. Зважаючи на можливі нерівномірності властивостей матеріалу при виробництві НМІПКМ один і той самий тиск у інжекційному каналі може призводити до занурення ІД на різну глибину, що призведе до неможливості адекватної інтерпретації даних, отриманих з ІД, в процесі експлуатації виробу. В зв'язку з цим необхідне коригування тиску у інжекційному каналі під час процесу в залежності від глибини розташування ІД.

3. Можливість лише одностороннього доступу до порожнистих виробів складної конфігурації [9]. З метою ресурсощадного використання НМІПКМ, які мають високу вартість, у виробах при проектуванні намагаються замінити суцільні елементи на тонкостінні, що призводить до необхідності контролю виробу з однієї сторони по всьому поперечному перетину.

Таким чином, при виготовленні виробів з НМІПКМ необхідно застосовувати метод неруйнівного контролю (НК), який дозволяє здійснювати одночасний точковий контроль діелектричної проникності матеріалу та контроль глибини розташування ІД, при цьому необхідно забезпечити можливість контролю як провідників, так і діелектриків.

Комплексу таких вимог у найбільш повній мірі задовольняє електроємнісний метод НК, який фактично може забезпечити вимірювання як діелектричної проникності так і глибини розташування дефекту або датчика, при цьому метод не потребує спеціальної підготовки поверхні, використання рідини і може бути безконтактним [10]. Цей метод широко використовується для вимірювання властивостей матеріалів (діелектрична проникність, вологість, товщина, тощо). Тобто використовується для інтегральної оцінки матеріалу об'єкта контролю. Сенсори, що використовуються для даного методу, мають дуже просту конструкцію та потребують мінімальні затрати для виготовлення [11].

На сьогоднішній день недостатньо досліджено використання електроємнісного методу для виявлення локальних дефектів або для точкового контролю властивостей виробів [12]. Це пов'язано з тим, що у випадку точкового контролю ємність конденсатора дуже мала і для точного вимірювання значень ємності в основному використовуються мостові методи, які потребують складних багатоступінчастих алгоритмів почергового зрівноваження як активної, так і реактивної компоненти. Це в свою чергу значно збільшує час вимірювання та ускладнює апаратну реалізацію таких вимірювачів. Це обумовлює актуальність задачі вдосконалення існуючого

електроємнісного методу та засобів для діагностики об'єктів контролю виробів з НМІПКМ.

У дисертаційній роботі дану задачу пропонується вирішити вдосконаленням існуючого електроємнісного методу контролю матеріалів шляхом визначення ємності за рахунок вимірювання параметрів комплексного коефіцієнта перетворення. А також шляхом оптимізації режиму роботи та форми сенсору.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення електроємнісного методу неруйнівного контролю матеріалів за рахунок підвищення його чутливості та швидкодії.

Для реалізації поставленої мети у дисертаційній роботі необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Провести аналіз існуючих методів контролю НМІПКМ та обґрунтувати шляхи їх вдосконалення.
2. Визначити раціональні параметри та режими роботи сенсору для забезпечення максимальної чутливості вимірювальної схеми шляхом математичного моделювання.
3. Дослідити вплив геометричної форми та розмірів сенсору на його чутливість шляхом математичного моделювання.
4. Розробити структури систем для підвищення чутливості сенсору та швидкодії приладу.
5. Провести експериментальні дослідження процесу контролю з метою підтвердження працездатності методу.
6. Впровадити результати досліджень та розробок в практику використання для виробничих та навчальних задач.

Об'єктом дослідження є процес електроємнісного контролю наномодифікованих інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення чутливості та швидкодії електроємнісного контролю матеріалів.

Методи дослідження. Поставлені в роботі задачі вирішувались на основі методів математичного моделювання процесів, технічної діагностики та неруйнівного контролю, експериментальних досліджень, сучасних методів числового моделювання з використанням методу скінченних елементів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Набув подальшого розвитку електроємнісний метод неруйнівного контролю на основі вдосконалення математичної моделі та використання амплітудно-фазового методу вимірювання сигналу для підвищення завадостійкості та розширення функціональних можливостей методу.
2. Вперше отримані залежності чутливості електроємнісного сенсору від електричних параметрів сенсора, що дозволило визначити оптимальний частотний діапазон для досягнення максимальної чутливості.
3. Обґрунтовано новий підхід до визначення оптимальної геометричної форми та розмірів сенсора за рахунок математичного моделювання розподілу параметрів електричного поля сенсора у просторі.
4. Розроблено інформаційну модель завадостійкої системи електроємнісного контролю, яка містить блоки одночасної реєстрації зміни фазового зсуву та амплітуди вимірювального сигналу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено нову форму електроємнісного сенсору з підвищеною чутливістю, що включає дві пари випромінюючих та приймаючих електродів.
2. Розроблено завадостійкий електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю з підвищеною чутливістю сенсору та швидкодією.
3. Визначено межі застосування методу для зразків за допомогою дослідження параметрів процесу контролю, що дало змогу розробити рекомендації по застосуванню методу.
4. Обґрунтовано можливість контролю діелектричної проникності у локальній точці з високою швидкістю.

5. Створено лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджено в КПІ ім. Ігоря Сікорського при виконанні науково-дослідної роботи та в навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю, а також в дослідницьку та виробничу діяльність ТОВ «ДП-Тест» (м.Київ).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи одержані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто автором виконано: [97, 98] – аналіз застосування електроємнісного методу неруйнівного контролю для матеріалів різної структури; [116, 117, 118] – числове моделювання та отримано рекомендації для визначення оптимальних параметрів та характеристик роботи системи і сенсора; [131, 132] – моделювання контролю матеріалів зі змінними провідними властивостями, зокрема наномодифікованих полімерних композитів; [133, 134, 135] – дослідження параметрів процесу контролю та меж застосування методу для провідних та непровідних зразків, здійснено моделювання контролю дефектів та параметрів сенсора, запропоновано конструкцію сенсора, яка демонструє найвищу чутливість; [138, 139, 140, 141, 142, 143] – розроблено спосіб підвищення завадостійкості, що дозволяє реєструвати з великою точністю зміну не тільки фазового зсуву вимірювального сигналу, але і зміну амплітуди вимірювального сигналу; [144, 145, 146] – обґрунтовано застосування методу для збільшення завадостійкості; [147, 148, 149] – проведено експериментальні дослідження, які підтвердили працездатність методу.

Апробація результатів дисертації. проводилась на таких конференціях і семінарах:

– IV науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2013);

- Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2015» (Минск, 2015);
- Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, 2016);
- Національна науково-технічної конференція та виставка «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (Київ, 2016);
- Науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2016);
- Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування» (Харків, 2016);
- Науково-практична конференція молодих вчених «Новітні технології пакування» (Київ, 2017);
- Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження» (Івано-Франківськ, 2017);
- XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2017);
- Міжнародна конференція «NDT DAYS» (Созополь, 2017).

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Публікації. За темою дисертаційних досліджень опубліковано 22 наукові праці, з яких 4 у фахових виданнях України (в тому числі 2, що входять до наукометричної бази Scopus), 3 патенти України на винахід, 3 патенти України на корисну модель, 2 статті в наукових виданнях України, 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

Основна частина дисертації представлена на 132 сторінках і містить 70 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 180 сторінок, у тому числі 3 додатки на 11 сторінках і список використаних джерел зі 150 найменувань на 16 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ НАНОМОДИФІКОВАНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Задачею огляду існуючих методів електричного неруйнівного контролю при виробництві НМІПКМ є аналіз методів, які можуть забезпечити необхідність точкового вимірювання діелектричної проникності матеріалу, необхідність контролю глибини розташування інтелектуальних датчиків у розплаві полімерного матеріалу у режимі реального часу та можливість лише одностороннього доступу до ОК.

1.1 Сучасні наномодифіковані інтелектуальні полімерні композиційні матеріали

Одним з нових та найбільш перспективних напрямів розвитку матеріалознавства є створення НМІПКМ. Такі наноккомпозити призначені для застосування у високонавантажених та особливо відповідальних виробках авіаційної, космічної, військової та інших галузей промисловості [1].

НМІПКМ – це полімерний композиційний матеріал, що має специфічні властивості завдяки його модифікації наповнювачами, вуглецевими нанотрубками (ВНТ), з уведеними у його структуру інтелектуальними датчиками та/або актюаторами, які дозволяють контролювати напружено-деформований стан (далі – н.д.с.) виробів та здійснювати певні перетворення форми або структури матеріалу.

Наномодифіковані полімери застосовують з метою істотного підвищення показників конструкційних, експлуатаційних та спеціальних властивостей виробів. В якості модифікаторів зазвичай використовують окремо синтезовані ВНТ, розміри яких не перевищують 100 нм. ВНТ мають надзвичайно високий

модуль пружності близько 1 ТПа, який можна порівняти з алмазом (1,2 ТПа) та демонструють міцність у 10–100 разів вище, ніж у конструкційних сталях [13]. Крім того, полімерні нанокompозити мають електричну провідність 105–107 См/м [14] і можуть перетворити діелектричний полімер в провідний композит.

Крім того, НМІПКМ здатні дистанційно передавати дані про свої властивості, зокрема н.д.с. для здійснення онлайн моніторингу. Це досягається за рахунок введення у полімерну матрицю інтелектуальних датчиків, що являють собою мініатюрні вимірювальні пристрої. Вони мають вигляд конструктивної сукупності вимірювальних перетворювачів величини, яку необхідно вимірювати і контролювати. Інтелектуальний датчик створює вихідний сигнал, зручний для дистанційного передавання та використання у системах автоматизованого керування.

У наш час надзвичайно актуальне питання отримання інформації про характеристики відповідальних деталей та вузлів, зокрема, про їх н.д.с., в реальному часі. Введення ІД у вироби з полімерних композиційних матеріалів дозволяє безпосередньо під час експлуатації здійснювати дистанційну діагностику та моніторинг цих виробів.

Сукупний світовий об'єм споживання НМІПКМ перевищує 13 млрд. дол. США. Ця сфера є одним з найбільш розвинутих комерційних сегментів ринку наноматеріалів. Середні річні темпи росту складають 15% [15].

Перспективні сфери застосування НМІПКМ наведені у табл. 1.1, де перераховані тільки типові сфери та можливості застосування. Звичайно, існує ряд розробок, що виходять за межі названих напрямів.

Проблема отримання даних з ІД у ПКМ є мультидисциплінарною. З одного боку, питання технологій та обладнання для введення датчиків у ПКМ, інтерпретації даних про н.д.с. та інші властивості, отримані з датчиків відносяться до полімерного машинобудування. З іншого боку, питання отримання сигналів про глибину введення інтелектуальних датчиків та їх

подальша обробка відносяться до неруйнівного контролю. Конструктивна розробка та технічне виконання самих ІД лежить у сфері мікроелектроніки.

Таблиця 1.1 – Перспективні сфери застосування НМІПКМ

Сектор індустрії	Галузі сектора	Можливості застосування
Національна безпека та оборона	Військово-промисловий комплекс	- контроль н.д.с. та цілісності військових рухомих одиниць в режимі реального часу; - отримання більш детальної інформації про н.д.с. при руйнуванні броні під час випробувань;
	Індивідуальний захист	- збільшення міцності індивідуальних засобів захисту, зниження їх ваги; - онлайн моніторинг пошкоджень засобів захисту;
	Військово-тактичне обладнання	- покращення експлуатаційних характеристик та захисту від дії навколишнього середовища; - контроль цілісності та справності каналів зв'язку;
	Урядовий зв'язок	- захист від несанкціонованого зчитування інформації з каналів зв'язку за допомогою контролю н.д.с. каналу по довжині;
Охорона здоров'я	Протезування	- покращення властивостей штучних імплантів (сердечних клапанів, штучних суглобів); - отримання інформації про н.д.с. імплантів з метою вчасного реагування на їх знос; - зміна форми протезів кінцівок за допомогою інтелектуальних актюаторів;
Авіакосмічний сектор	Космічна галузь	- отримання інформації про стан найбільш відповідальних вузлів (обтічники, стабілізатори) у реальному часі; - більш деталізована інформація про н.д.с. під час випробувань;
	Авіаційна галузь	- контроль експлуатаційних характеристик деталей та вузлів літаків під час польоту; - прискорення міжпольотного обслуговування літаків за рахунок онлайн моніторингу н.д.с. вузлів;
Машинобудування	Автомобілебудування	- контроль за станом відповідальних вузлів для здійснення завчасного технічного обслуговування; - всебічна інформація про н.д.с. під час випробувань на безпечність;
	Суднобудування	- контроль цілісності днища судна під час руху; - контроль н.д.с. корпусу судна при дії зовнішніх сил та природних явищ.

Датчики, виготовлені на основі різних матеріалів і технологічних процесів тривалий час використовуються в різних сферах промисловості для

перетворення неелектричних сигналів в електричні. Датчики, які використовуються для НМІПКМ мають вигляд мініатюрних сенсорних пристроїв, що вводяться в матеріал.

Датчики поділяють на два типи: активні та пасивні. Перший тип, активні датчики, мають змогу випромінювати і приймати сигнали, пасивні датчики – реєструють і аналізують зміни без використання випромінювань.

Такі системи датчиків, як ємнісні фіксують зміни величини і фази змінного струму, датчики індукційного типу фіксують зміну індуктивності при внесенні в контрольований об'єм феромагнітних або провідних компонентів.

Датчики, які випромінюють та обробляють сигнали, що виникають при механічному впливі на матеріал, використовують процеси електронної, електромагнітної, акустичної емісії.

Імпульси електромагнітного поля можуть реєструватися при розшаруванні матеріалу, зародженні та розвитку тріщин, розриві волокон. Електромагнітна емісія дозволяє з високою точністю прогнозувати міцність матеріалу, залишковий ресурс роботи виробів, експлуатованих в умовах вібраційного, статичного, динамічного навантаження, граничні навантаження. При дії на матеріал динамічних навантажень (удар, тепловий або імпульсний акустичний вплив) емісія виникає як в точці впливу, так і в напрямку поширення акустичних хвиль, таким чином несе в собі інформацію про внутрішню будову матеріалу.

Поведінка матеріалів в електричних полях визначається складним зв'язком між властивостями матеріалу, температурою та індукцією. При цьому можливе виникнення п'єзоефекту і піроефекту.

На вібрації та імпульси реагують електромагнітні, п'єзокерамічні, магнітометричні, трибоелектричні (ефект контактної електролізації), інерційно-механічні, вібродатчики.

П'єзоелектричні датчики – вимірювальні перетворювачі, які працюють за рахунок п'єзоелектричного ефекту та служать для перетворення механічного зусилля в електричний сигнал.

Датчики, які засновані на принципі акустичної емісії, виготовляють з полімерів (наприклад, з полівініліденфториду), які здатні при зміні зовнішнього навантаження генерувати електричні заряди.

Ультразвукові п'єзоперетворювачі використовуються в якості сенсорів, які інформують про н.д.с., тріщини, розшарування, пористості, дефекти в об'ємі матеріалу. Чутливі елементи таких перетворювачів виготовлені у вигляді монолітних блоків в поєднанні з демпферами зі змінними акустичними характеристиками.

Датчики тиску на основі магнітострикційних матеріалів – вимірювальні перетворювачі, дія яких заснована на магнітострикційному ефекті, і ефекті Віллари, які мають зворотні до магнітострикції властивості – змінюють намагніченості матеріалу при його деформації. Магнітострикційні ефекти використовуються при розробці датчиків і мікродвигунів з п'єзомагнітних і п'єзоелектричних матеріалів.

Електроп'єзокерамічні полімерні матеріали отримують за допомогою наповнення епоксидних полімерів, термопластів, поліуретанів, гум керамічними порошками і волокнами. У керамічних п'єзоматеріалів деформації і напруження призводять до появи електричного заряду. Цей електричний заряд перетворює електричне поле в механічне напруження, збуджуючи ультразвукову хвилю. Аналогічні властивості мають п'єзополімери і полімерні матеріали, наповнені п'єзокомпонентами.

Датчиками для оцінки ступеня вібрації виготовляють з магнітоеластичних аморфних матеріалів з високим (до 95%) коефіцієнтом прямого і зворотного перетворення електроенергії в механічну енергію, наприклад, на основі полімерних магнітів. Полімерні магнітні матеріали – це композиційні матеріали на основі полімерних сполучників (термопластичних – пластифікований ПВХ,

ПЕ, сульфохлорирований ПЕ, поліаміди, полістироли; термореактивних епоксидних, фенолоальдегідних, ненасичених олігоєфірних; еластичних – гумові суміші з каучуками різних типів, в тому числі олігомерних «рідких», термоеластоласти) і магнітних порошків (порошки сплавів з рідкоземельними елементами самарій-кобальт, ферити, самарій-залізо).

Постійні магніти на полімерній основі, що мають наповнювачі у вигляді дисперсних магнітних частинок використовуються при виробництві датчиків і виконавчих пристроїв, приводних механізмів і електродвигунів, електронних систем управління. Переваги їх використання в якості генераторів сигналів в датчиках полягають у можливості додавання магнітних функцій компактному пристрою шляхом створення магнітних полів різного напрямлення при формуванні в литтєвій формі. Вони легко вбудовуються в пристрої, з'єднуються з компонентами складних вузлів (зубчастими колесами, валами, фіксаторами), мають високу стабільність розмірів і міцність, високу корозійну стійкість [1, 8].

1.2 Особливості виготовлення наномодифікованих інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів

Для серійного виробництва виробів з НМІПКМ, які можуть в реальному часі передавати достовірну інформацію, необхідне досягнення можливості точного позиціонування ІД в заданих координатах об'єму виробів в автоматизованому технологічному процесі.

Крім того, однією зі складностей при контролі процесу виготовлення такого типу матеріалів є те, що в залежності від концентрації ВНТ у полімерному матеріалі може значно змінюватися діелектрична проникність, аж до набуття властивостей провідника. При чому, через високу здатність ВНТ до агломерування діелектрична проникність може змінюватись у окремих точках виробів.

При виготовленні НМІПКМ наявність дефектів у виробі може бути спричинена двома факторами: наявністю агломерації ВНТ при диспергуванні системи та нерівномірністю температурних та механічних полів у переробному обладнанні.

Для рівномірного розподілу ВНТ у полімерній матриці застосовують ультразвукові гомогенізуючі диспергатори–кавітатори [16]. При диспергуванні важливо ефективно налаштувати конструктивні і експлуатаційні параметри ультразвукового обладнання для досягнення максимальної однорідності системи [17]. Проте, робота такого обладнання потребує постійного неперервного контролю якості диспергування.

При серійному виготовленні індивідуальних полімерних виробів застосовують методи пресування та лиття під тиском, при чому необхідно здійснювати автоматизоване введення ІД в певні точки об'єму виробів [8].

Для виготовлення виробів методом лиття під тиском на термопластавтоматі здійснюють вприскування розплаву полімеру в форму до моменту її заповнення під заданим тиском. Після цього щупом вводять ІД на задану координату в об'ємі виробу, виводять щуп з порожнини форми, а тиск знижують до заданого в технологічному регламенті значення витримуючи протягом певного часу, після чого охолоджують без тиску, розкривають форму та виймають сформований виріб.

Для формування довгомірних виробів з ІД, які мають внутрішню порожнину, методом екструзії застосовують екструзійну головку [8]. В результаті такого технологічного процесу на виході з головки одержується полімерний виріб, в стінці якого містяться інтелектуальні датчики.

З метою ресурсощадного використання НМІПКМ, які мають високу вартість, у виробках при проектуванні намагаються замінити суцільні елементи на тонкостінні, що призводить до необхідності контролю виробу з однієї сторони по всьому поперечному перетину.

Таким чином, найбільш актуальними проблемами при виробництві НМІПКМ є:

1. Необхідність точкового вимірювання діелектричної проникності матеріалу у режимі реального часу для контролю рівномірності розподілення ВНТ у полімерній матриці. Незважаючи на використання сучасних змішувачів та гомогенізаторів ВНТ мають схильність до утворення агломератів, які призводять до значного погіршення властивостей виробу та неможливості його використання. В зв'язку з цим необхідно під час виробничого процесу здійснювати контроль рівномірності розподілу ВНТ через точкове вимірювання діелектричної проникності.

2. Необхідність контролю глибини розташування інтелектуальних датчиків (ІД) у розплав полімерного матеріалу у реальному часі для можливості коригування технологічних параметрів переробного обладнання [8]. Зважаючи на можливі нерівномірності властивостей матеріалу при виробництві НМІПКМ один і той самий тиск у інжекційному каналі може призводити до занурення ІД на різну глибину, що призведе до неможливості адекватної інтерпретації даних, отриманих з ІД, в процесі експлуатації виробу. В зв'язку з цим необхідне коригування тиску у інжекційному каналі під час процесу в залежності від глибини розташування ІД.

1.3 Огляд методів для контролю наномодифікованих інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів

Вартість виготовлення НМІПКМ є надзвичайно високою [18], тому важливо забезпечити можливість проведення неруйнівного контролю виробів з них на всіх етапах виробництва. Це пов'язано з тим, що наявність дефектів може значною мірою вплинути на властивості готового виробу.

Для контролю НМІПКМ зазвичай використовуються два види методів неруйнівного контролю: ультразвукові та електричні [19].

1.3.1 Ультразвукові методи неруйнівного контролю

Для ультразвукового НК здебільшого застосовуються коливання частотою від 20 кГц до 50 МГц. Інтенсивність коливань при цьому невелика: не перевищує 1 кВт/м². Такі коливання відбуваються в області пружних деформацій, де деформації і напруги пов'язані пропорційною залежністю.

Відомо багато акустичних методів неруйнівного контролю, деякі з яких застосовуються в декількох варіантах. Їх ділять на дві великі групи - активні і пасивні методи [20].

Активні методи ґрунтуються на випромінюванні і прийманні пружних хвиль, пасивні - тільки на прийманні хвиль, джерелом яких служить сам контрольований об'єкт.

Активні методи поділяють на тіньові методи, луна методи, комбіновані, імпедансні і методи власних частот.

Тіньові методи застосовували тільки для виявлення несучільностей, змінюють параметри наскрізного сигналу внаслідок утворення за дефектом акустичної тіні. Однак потім ці методи почали використовувати для контролю міцності, пористості, структури та інших параметрів матеріалу, не пов'язаних з наявністю тіні.

Пасивні акустичні методи засновані на аналізі пружних коливань хвиль, що виникають в самому контрольованому об'єкті.

Застосування акустичних засобів контролю фізико-механічних властивостей матеріалів (величина зерна, модулів пружності, твердості, текстури, міцності і т.п.) засновано на зв'язку цих властивостей з акустичними характеристиками матеріалів [21-23].

Таким чином, ультразвуковий метод не дозволяє комплексно вирішити поставлену задачу в зв'язку з неможливістю точкового вимірювання діелектричної проникності матеріалу.

1.3.2 Електричні методи неруйнівного контролю

Електричний контроль - це вид НК, заснований на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з ОК, або виникає в ОК в результаті зовнішнього впливу [24]. В якості первинних інформативних параметрів використовуються різні електричні характеристики ОК, серед яких: електричний опір, електрична провідність, електрична ємність, відносна діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат, електричний потенціал, електрорушійна сила, електричний струм.

Електричні методи НК класифікуються залежно від первинного інформативного параметра, що використовується, способу отримання первинної інформації та характеру взаємодії електричного поля з об'єктом. Перш за все, слід виділити групи електропараметричних і генераторних методів НК [20].

До електропараметричних відносяться методи, засновані на реєстрації електричних характеристик об'єкта контролю [25-39]. Найбільш поширеними методами цієї групи є:

- метод електричного опору - заснований на реєстрації електричного опору ділянки об'єкта контролю;
- електроємнісний метод - заснований на реєстрації ємності конденсатора, що включає ділянку об'єкта контролю;
- метод контактної різниці потенціалів - заснований на реєстрації контактної різниці потенціалів на ділянках об'єкта контролю, через який пропускається електричний струм;
- електростатичний порошковий метод - заснований на реєстрації електростатичних полів розсіювання з використанням в якості індикатора наелектризованого порошку;

- електроіскровий метод - заснований на реєстрації виникнення електричного пробою і змін його параметрів в об'єкті контролю або на його ділянці;

До групи генераторних відносяться методи, засновані на реєстрації електричних сигналів, що формуються самим ОК. Найбільш поширеними методами цієї групи є:

- термоелектричний метод - заснований на реєстрації величини термоелектрорушійної сили, що виникає внаслідок прямого контакту нагрітого зразка відомого матеріалу з об'єктом контролю;

- трибоелектричний метод - заснований на реєстрації величини електричних зарядів, що виникають в об'єкті контролю при терті різних матеріалів;

- метод рекомбінаційного випромінювання - заснований на реєстрації рекомбінаційного випромінювання р-п переходів у напівпровідникових виробках;

- метод екзоелектронної емісії - заснований на реєстрації екзоелектронів, емітованих поверхнею ОК при прикладенні до нього зовнішнього стимулюючого впливу.

Характерною особливістю електричних методів НК є те, що значення інформативних параметрів, що використовуються, визначаються спільним впливом цілої низки чинників, що характеризують як ОК і умови його експлуатації, так і зовнішні впливи і технічні характеристики засобів контролю. До числа зазначених факторів відносяться, наприклад: конструктивне виконання і геометричні розміри ОК; вид, хімічний склад, структура, технологічні умови виготовлення та фізичні властивості матеріалів, що використовуються; температура ОК; наявність різних за своєю природою дефектів в матеріалах (неоднорідність структури, тріщини, раковини та ін.); теплові і механічні дії на ОК; вплив електромагнітних полів [40, 41].

Вказані обставини свідчать про універсальність електричних методів і можливості вирішення з їх допомогою різних завдань НК, як окремих, які полягають у виділенні інформації про окремі характеристики ОК, так і завдань комплексного контролю, діагностування та прогнозування стану ОК в цілому [42-46].

У той же час, непрямий характер оцінки контрольованих параметрів ОК, багатофакторність впливу, як правило, низькі рівні аналізованих сигналів співмірні з рівнем перешкод, істотно ускладнюють практичну реалізацію методів НК при вирішенні конкретних завдань і припускають в кожному випадку розробку спеціальних методів виділення корисної інформації про ОК, відбудови від впливу неконтрольованих в даному випадку параметрів і перешкод.

У зв'язку з цим, електричні методи НК, що мають у порівнянні з іншими методами низку незаперечних переваг, давно відомі та успішно застосовуються в ряді галузей промисловості, розвивалися не так інтенсивно, як, наприклад, радіаційні, акустичні, вібраційні, вихрострумові. Істотний розвиток електричні методи отримали за останні десятиліття, що обумовлено потребами в рішенні відповідних завдань НК і високим рівнем розвитку електронної та мікропроцесорної вимірювальної техніки [47].

Для вирішення поставленої задачі найбільш доцільно використовувати електроємнісний метод неруйнівного контролю.

Електроємнісний метод неруйнівного контролю здатен забезпечити контроль дефектів у матеріалах з різними властивостями, від діелектриків до провідників [6]. Таким чином, застосування електроємнісного методу є найбільш прийнятним для контролю дефектів у НМПКМ. Визначення можливостей та меж застосування методу при контролі полімерних нанокompatитів дозволяє застосовувати цей метод при промисловому виробництві відповідальних деталей та вузлів.

1.4 Електроємнісний метод неруйнівного контролю

Електроємнісний метод базується на введенні ОК або його ділянки в електростатичне поле, джерелом якого є електричний конденсатор. Конденсатор, який є в даному випадку первинним перетворювачем, виконує перетворення фізичних і геометричних характеристик ОК в електричний параметр – ємність конденсатора [48].

В якості вимірюваної величини можуть виступати фізико-механічні та геометричні властивості і параметри об'єкта неруйнівного контролю, що впливають на один з параметрів конденсатора, наприклад, відносну діелектричну проникність [49]; розміри і форму; густину [50]; зміст компонентів в сумішах; вологість; хімічний склад; механічну напругу і т.д. [51-54].

Параметри електричного конденсатора змінюються внаслідок зміни під дією вимірюваної величини площі перекриття обкладок, відстаней між обкладками, або діелектричної проникності середовища, що знаходиться між обкладинками. Ємнісні методи відносять до параметричних, так як у конденсатора зі зміною вимірюваної величини змінюється електрична ємність або кут діелектричних втрат, що є складовими комплексної провідності і розглядаються як первинні інформативні параметри електроємнісного методу контролю [48].

Ступінь кореляції ємності і кута діелектричних втрат з параметрами ОК дуже різна. Так, наприклад, значення кута діелектричних втрат в основному визначається складом, вологістю ОК і ступенем полімеризації його матеріалу [55], але на нього слабо впливають геометричні розміри об'єкту і стан його поверхні. У той же час на ємність однаково сильний вплив мають як перераховані величини, так і стан навколишнього середовища (тиск, температура, вологість), геометрія і стан поверхні ОК.

Слід зазначити, що інформативні параметри електроємнісного методу залежать також від конструкції перетворювача і електричних характеристик середовища, в яку поміщений ОК. Перша обставина враховується при оптимізації конструкції перетворювача, друга зазвичай є причиною виникнення факторів, що заважають контролю. Тому внаслідок багатопараметричної інформації про ОК необхідні заходи для виділення інформації про вимірювальні параметри [56].

Перевагами електроємнісного методу НК є [20]:

- відсутня необхідність у підготовці поверхні для проведення контролю;
- не потребує застосування контактної рідини та безпосереднього контакту з ОК;
- можливість виготовлення конденсатора з високою точністю і малими втратами;
- можливість отримання інформації про параметри ОК як в порівняно великих обсягах матеріалу, так і в його локальних ділянках і на певній глибині;
- можливість проведення контролю з одностороннім доступом до ОК.

Основними недоліками, що обмежують застосування електроємнісного методу, є мала ємність конденсаторів, використовуваних як перетворювачі, вплив на величину ємності температури навколишнього середовища, вологості повітря або діелектрика, розташованого між їх пластинами, а також інших зовнішніх факторів.

Область використання ємнісних методів НК вельми різноманітна. Найбільш широко вони використовуються для вимірювання малих переміщень і величин, що легко перетворюються в переміщення [57], наприклад тисків, і контролю властивостей тіл: діелектричної постійної і пов'язаних з нею величин, наприклад вологості, рівня і температури.

Ємнісні методи дозволяють контролювати товщину пластин [58], оболонок і діелектричних покриттів на провіднику і навіть на діелектрику за

умови, що цей діелектрик має іншу діелектричну проникність, ніж матеріал покриття. Досвід розробки сучасної апаратури показує, що ємнісні методи успішно застосовуються для контролю несплошності ряду діелектриків і слабопровідних рідин [59], рівня діелектричних і провідних середовищ, тиску практично в будь-яких середовищах, стану структури матеріалу [60-63].

У електроємнісному НК зазвичай реалізується порівняння вимірюваної величини з величиною, що відтворюється мірою. В цьому випадку вимір полягає у встановленні рівності або певного співвідношення між значеннями вимірюваної величини і величини, що відтворюється мірою.

Ємнісні перетворювачі найчастіше працюють в області слабких електромагнітних полів. Для таких полів діелектричне середовище досить охарактеризувати двома параметрами: діелектричної проникністю ε і кутом діелектричних втрат δ . Діелектрик перетворювача вносить додаткові втрати, тому різниця фаз струму і напруги менше 90° на кут, званий кутом втрат.

Зазвичай замість кута діелектричних втрат розглядається його тангенс $\operatorname{tg}\delta$. У більшості матеріалів $\operatorname{tg}\delta$ зменшується з ростом частоти, що відповідає паралельній схемі заміщення, при послідовній схемі $\operatorname{tg}\delta$ зростає зі збільшенням частоти. Тому на практиці для низьких частот частіше використовують паралельну схему заміщення, а послідовну застосовують на високих частотах в тих випадках, коли це спрощує розрахунки.

Кут втрат $\operatorname{tg}\delta$ для різних діелектриків різний. Разом з тим ця величина залежить від температури, вологості, частоти і напруги на конденсаторі. Очевидно, що на принципі вимірювання кута втрат можна будувати різні прилади, наприклад вологоміри.

Неруйнівний контроль електричних властивостей матеріалу можливий за допомогою вимірювання ємності C_1 і тангенса кута втрат $\operatorname{tg}\delta_1$ зразкового матеріалу та C_2 і $\operatorname{tg}\delta_2$ досліджуваного матеріалу. Тоді діелектрична проникність і тангенс кута втрат матеріалу визначаються з виразів:

$$\varepsilon_{\text{м}} = \frac{C_2 - C_1}{C_0} + 1,$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{м}} = (\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1) \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{\text{м}}} \right).$$

де C_0 – робоча (початкова) ємність перетворювача.

У тих випадках, коли ємність перетворювача застосовується для визначення властивостей діелектриків, необхідне введення таких характеристик діелектрика, які б не залежали від конструкції перетворювача і, зокрема, від його ємності або опору втрат. Для введення таких параметрів використовують наступний прийом. Електрична ємність, включена в ланцюг змінного струму, поводить ся як комплексний опір тим менше, чим вона більша і чим вище частота змінного струму.

Обчислення проводяться за допомогою формул, що визначають середні значення діелектричної проникності суміші через діелектричні проникність компонентів і їх об'ємну або масову концентрацію. Ці формули можуть бути використані і для оберненої задачі, визначення характеристик складу матеріалу, наприклад, вологості, коефіцієнта армування, пористості по діелектричній проникності всієї композиції і окремих її компонентів, а також для визначення діелектричної проникності одного з компонентів якщо відомі інші параметри [20].

Огляд наявних для розрахунку формул показує, що в даний час не існує універсальної аналітичної моделі діелектричних властивостей гетерогенних систем. Тому основою для вивчення електричних властивостей тіл, як і раніше, є експериментальні дані.

Базову конструкція типового сенсора ємнісної дефектоскопії можна розглядати як паралельно-плоский конденсатор, електроди якого розташовані в тій же площині, як показано на рис. 1.1 [64].

Найбільш простими для розрахунку є сенсори, які показані на рис. 1.1, а. Аналітичний розрахунок сенсорів, що зображені на рис. 1.1, б, набагато

ускладнений. Розрахунок сенсорів, зображених на рис. 1.1, в, проводять з застосуванням математичного моделювання.

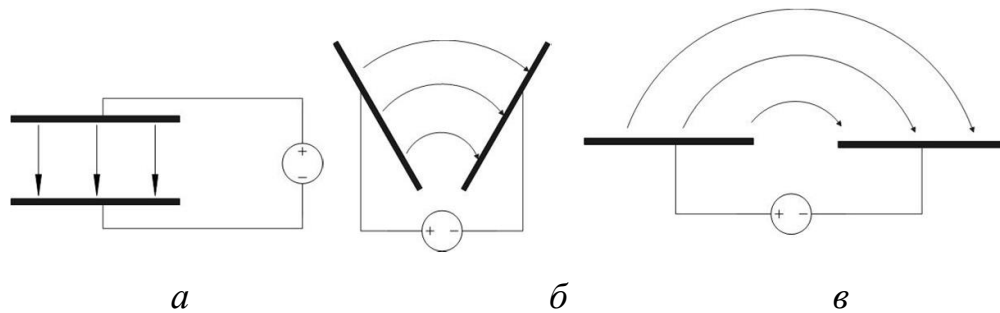


Рисунок 1.1 – Базові сенсори

Найбільший інтерес при дефектоскопії матеріалів представляють сенсори розгорнутого типу (рис. 1.1, в). Вони дозволяють проводити контроль при односторонньому доступі до ОК [65].

Тому, в роботі розглянуто типовий первинний перетворювач для електроємнісного методу, який має вигляд розгорнутого плоского конденсатора, під пластинами якого знаходиться ОК (рис. 1.2). Наявність дефекту в межах чутливості електричного поля в ОК призведе до зміни величини заряду, індукованого на приймаючому електроді [66]. Якщо розглядати пару електродів, зображену на рис. 1.2, як конденсатор, то наявність дефекту в ОК між пластинками цього конденсатора призведе до зміни сумарної діелектричної проникливості середовища, що в свою чергу призведе до зміни електричної ємності конденсатора [67].

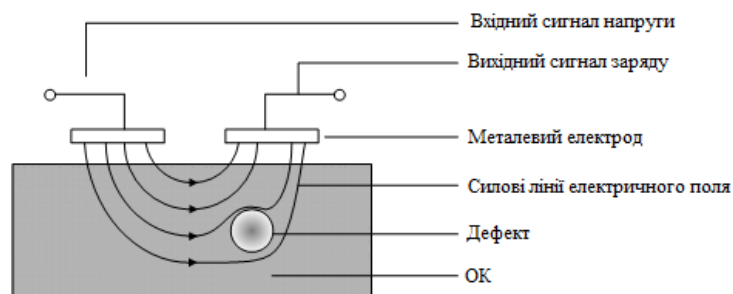


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення процесу формування вихідного сигналу для електроємнісного методу

Існує велика кількість різних видів ємнісних сенсорів. Першу згадку про ємнісні сенсори знайдено у роботі [68], і з тих пір ємнісні сенсори розвиваються. Більшість ємнісних сенсорів засновані на фізичних концепціях простої моделі паралельного конденсатора [69]. У цій моделі, ємність, C , пов'язана з іншими параметрами співвідношенням:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}, \quad (1.1)$$

де d – відстань між пластинами, м;

S – площа пластини, м²;

ε – абсолютна діелектрична проникність матеріалу між пластинами.

Поведінка електричного поля відрізняється від зразка, який має властивості ізолятора або провідника. Якщо зразок, який тестують – діелектричний матеріал чи має дуже низьку провідність, електричне поле, що генерується сенсором матиме певний вплив на зразок, який тестують [70]. Будь-який дефект деформуватиме електричне поле, і змінить кількість індукованих зарядів на приймаючому електроді, як показано на рис. 1.3.

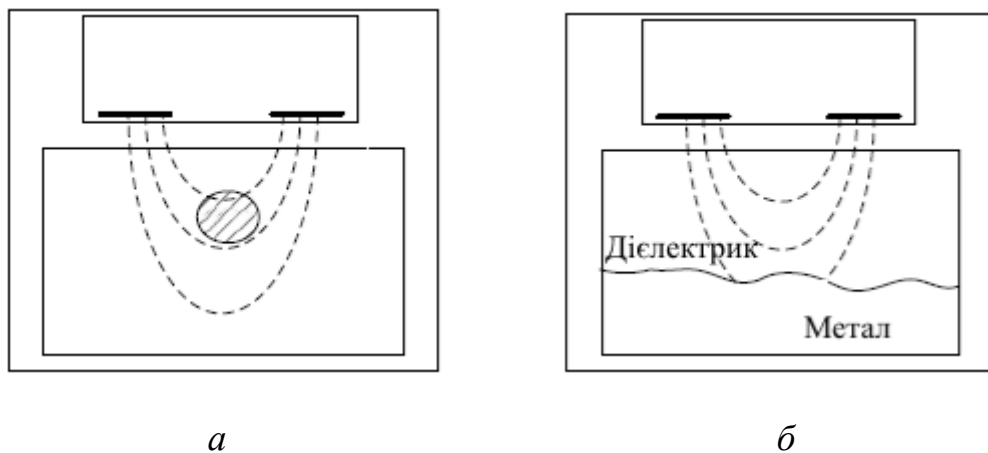


Рисунок 1.3 – Графічне пояснення механізмів контролю для (а) діелектричного зразка та для (б) зразка з ізоляційним покриттям

Якщо зразок, який тестують є провідником, то електричне поле проникає як через ізоляційне покриття, так і через повітряний зазор, і досягає поверхні провідника. Через високу провідність заряди можуть вільно переміщатися і накопичуватися на поверхні провідника. У результаті замість того, щоб йти далі в провідник, електричне поле буде створювати потенційну поверхню [71], як показано на рис. 1.3, б. Таким чином, тільки поверхневі риси провідника (наприклад, тріщини, корозія і т.д.) будуть змінювати структуру локального електричного поля і, тому зміниться кількість індукованого заряду на приймаючому електроді. Зауважимо, що цей підхід є безконтактним і повітряний зазор між електродами і зразком може бути достатньо великим. Таким чином, підготовка поверхні зразка не потрібна. Крім того, підхід може бути реалізовано при односторонньому доступі до випробуваного зразка.

Очевидно, що чутливість методу до розмірів дефекту буде залежати від площі пластин сенсора. Чим менше розмір дефекту тим менша площа сенсора необхідна для його локалізації. Це, в свою чергу, зменшує ємність конденсатора і значно ускладнює процес її вимірювання.

Розрахункові формули ємності для деяких типових конденсаторів були отримані дослідниками [68]. Крім того, багато інших конфігурацій електродів були вирішені аналітично. Для розрахунку ємності плоского конденсатора прийнято використовувати конформне відображення [72]. Це використовувалось для розрахунку ємності конденсаторів з двома смужками в одній площині [73], конденсаторів типу “палець ріжучого апарату” [74], гребінчастих конденсаторів [75], багаторівневі металеві конденсатори [76], конденсаторів з циліндричним діелектриком [77, 78], і конденсатори з довільним поперечним перерізом [79]. Тим не менш, конформне відображення застосовується лише в 2D-випадках (в площині поперечного перерізу). Також існують інші методи, такі як функції Гріна [80] і метод моментів [81].

Однак ці способи придатні тільки для конфігурацій, які мають правильну симетрію (наприклад, концентричні геометричні форми). Щоб

охарактеризувати сенсори складної форми необхідним є 3D-аналіз [82]. Таким чином, необхідно використовувати числові методи.

1.5 Аналіз публікацій застосування електроємнісного методу неруйнівного контролю

Аналіз урядових та корпоративних звітів з науково-технічних робіт США, Японії та Китаю [83–87] свідчить про широке застосування НМІПКМ в різних галузях промисловості. Незважаючи на це, у відкритих джерелах повністю відсутня вичерпна інформація про технологічні процеси виготовлення виробів з НМІПКМ. Це пояснюється використанням НМІПКМ здебільшого в галузях промисловості, для яких є характерним обмеження доступу до провідних науково-технічних розробок: військово-промисловий комплекс, авіакосмічний сектор, спеціальне машинобудування.

Окремі публікації на тему виготовлення виробів з НМІПКМ [1, 2, 4, 8, 9] несуть у собі обмежену інформацію та розглядають проблему лише односторонньо, без застосування комплексного підходу.

В умовах значної обмеженості інформації щодо неруйнівного контролю саме НМІПКМ при аналізі літературних джерел слід розглядати такі матеріали як звичайні полімерні композити з певними обмеженнями щодо застосування окремих типів НК.

У роботах [88, 89] розглядається метод неруйнівного контролю, що здатний здійснювати візуалізацію дефектів у широкому спектрі матеріалів і конструкцій, починаючи від ізоляторів до металевих провідників. Цей метод, при подальшій модифікації, може бути застосований для візуалізації дефектів у готових виробах з НМІПКМ у процесі контролю під час їх експлуатації. Але, цей метод не дозволяє контролювати дефекти при виробничому процесі у реальному часі через низьку швидкість контролю.

У роботах [90, 91, 92] автори розглядають питання неруйнівного контролю неметалевих матеріалів, зокрема полімерів, з застосуванням електроємнісного методу та визначають можливості знаходження дефектів у полімерних матеріалах. Проте роботи присвячені лише питанням знаходження дефектів у діелектричних матеріалах з однорідними властивостями. Зважаючи на те, що НМІПКМ можуть змінювати свої електричні властивості залежно від концентрації ВНТ та можливі неоднорідності структури полімерних матриць, контроль такого класу матеріалів неможливий зазначеним методом.

Контроль виробів з НМІПКМ під час експлуатації можливо здійснювати за допомогою плівкових багатошарових сенсорів [93], які дозволяють здійснювати моніторинг втомної довговічності, деформації у матеріалі в режимі реального часу. Але для таких ендосенсів необхідно забезпечити міцний контакт з ОК, що унеможливує застосування даного методу у виробничому процесі екструзії з необхідністю контролю матеріалу, який неперервно проходить крізь зону контролю.

Автори [94, 95] розробили методику контролю виробів з полімерним нанесенням, на прикладі електричного дроту, в ході виробництва. Метод забезпечує мінімальну похибку вимірювань, викликану впливом геометричних розмірів виробу, електричних властивостей матеріалу та зміною електричної провідності. За допомогою методу можливо здійснювати виявлення локальних дефектів (тріщин, порожнин) у виробі. Але технічна реалізація методу потребує доступу до ОК з усіх боків, крім того не розглянуто питання можливості контролю виробів з формою, відмінною від циліндричної.

У роботі [96] пропонується метод визначення діелектричної проникності полімерних плівок шляхом вимірювання ємності за допомогою двох паралельних дрітків, розміщених на поверхні плівки. Даний метод дозволив би вирішити частину задачі контролю виробництва НМІПКМ, але він може бути застосований лише для тонких виробів у формі плівки.

Таким чином, аналіз публікацій застосування методів НК при виробництві НМПКМ показав, що на даний момент відсутній метод, який дозволив би одночасно вирішити всі технічні проблеми контролю, що виникають в ході технологічного процесу.

Огляд існуючих методів електричного неруйнівного контролю при виробництві НМПКМ продемонстрував, що ультразвуковий метод НК не повністю задовольняє поставлені задачі, так як може контролювати лише глибину включень у виробі, але не може здійснювати контроль діелектричної проникності.

Серед електричних методів НК електроємнісний метод є одним з найбільш інформативних та зручних для використання, за його допомогою можливо вирішити всі задачі дослідження.

Проте, до цього часу електроємнісний метод застосовувався тільки для інтегральної оцінки діелектричної проникності об'єкту контролю. Використання методу для локального контролю обмежено значним часом контролю, що обумовлено використанням мостових схем для вимірювання малих значень ємності з високою точністю, які потребують багатоступеневих алгоритмів, що призводить до значних затрат часу на вимірювання. При скануванні ОК в багатьох точках затрати часу стають неприпустимо великими.

Крім того, для цього методу не існує аналітичних способів знаходження ємності для несиметричних сенсорів та сенсорів складної форми, що потребує використання комп'ютерних методів для знаходження ємності. Також, відкритим є питання боротьби з електромагнітними завадами.

1.6 Мета і завдання дисертаційної роботи

Мета роботи – удосконалення електроємнісного методу неруйнівного контролю матеріалів за рахунок підвищення його чутливості та швидкодії.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів контролю НМІПКМ та обґрунтувати шляхи їх вдосконалення.

2. Визначити раціональні параметри та режими роботи сенсору для забезпечення максимальної чутливості вимірювальної схеми шляхом математичного моделювання.

3. Дослідити вплив геометричної форми та розмірів сенсору на його чутливість шляхом математичного моделювання.

4. Розробити структури систем для підвищення чутливості сенсору та швидкодії приладу. Запропонувати та дослідити методи поліпшення параметрів ємнісних сенсорів.

5. Провести експериментальні дослідження процесу контролю з метою оцінки достовірності контролю.

6. Впровадити результати досліджень та розробок в практику використання для виробничих та навчальних задач.

Отримані в роботі результати відповідають паспорту спеціальності 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин, у пунктах:

- підвищення точності, вірогідності, чутливості, швидкодії, надійності приладів контролю та визначення складу речовин;
- прилади й обладнання для систем тестової діагностики об'єктів;
- прилади неруйнівного контролю матеріалів і виробів.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ

2.1 Теоретичні положення

Найбільш загальне формулювання законів електромагнітних полів дано Максвеллом, який об'єднав спостереження Фарадея, Гаусса і Ампера в чотирьох рівняннях, що пов'язують електромагнітне поле з його джерелами. Рівняння Максвелла мають вигляд

$$\begin{aligned}\nabla \times \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \bar{H} &= \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \bar{D} &= \rho, \\ \nabla \cdot \bar{B} &= 0,\end{aligned}$$

де ∇ – оператор Гамільтона;

\bar{E} – напруженість поля, В/м;

\bar{B} – магнітна індукція, Тл;

\bar{H} – напруженість магнітного поля, А·в/м;

\bar{J} – густина струму, А/м²;

\bar{D} – електрична індукція, Кл/м²;

ρ – густина заряду, Кл/м³.

Для вирішення рівнянь Максвелла застосовують додаткові рівняння, які можуть бути записані як

$$\begin{aligned}\bar{D} &= \epsilon_0 \epsilon \bar{E}, \\ \bar{B} &= \mu_0 \mu \bar{H},\end{aligned}$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E},$$

де ε – відносна електрична проникність;

μ – відносна магнітна проникність;

σ – електропровідність матеріалу, См/м.

Рівняння Максвелла, які встановлюють зв'язок між електричними і магнітними полями, необхідні для кількісного аналізу електромагнітної задачі. Тим не менш, за певних умов, спрощене наближення, яке ігнорує магнітні поля, є можливим без значної втрати точності. Системи, в яких це наближення є прийнятним визначаються як статичні (квазістатичні) системи. Термін “квазістатичний” в електродинаміці відноситься до випадку, коли "система є меншою, у порівнянні з довжиною електромагнітної хвилі, пов'язаної з домінуючою шкалою часу" [99]. Детальніше про квазістатичне наближення сказано у праці [100]. У межах запропонованого методу частота використовується, як правило, в діапазоні від 1 кГц до 1 МГц, хоча існують методи з використанням частоти більше 1 ТГц [101]. Отже, відповідна довжина хвилі лежить в діапазоні від 300 м до 300 км, що значно більше, ніж розміри сенсора. Таким чином, метод підходить під визначення квазістатичного режиму. У цьому режимі магнітне поле змінюється так повільно, що його можна розглядати як процес, який відокремлюється від електричного поля. Тому можуть використовуватись спрощені версії рівнянь Максвелла

$$\nabla \times \bar{E} \approx 0,$$

$$\nabla \times \bar{H} \approx 0,$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho,$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0.$$

З цих спрощених рівнянь випливає, що електричне поле з напруженістю \bar{E} , утворене за допомогою об'ємного заряду густиною ρ , і напруга магнітного поля \bar{H} наближуються до нуля. Крім того, можна виразити

електричне поле \vec{E} як градієнт скалярної функції φ , що називається електричним потенціалом або напругою

$$\vec{E} = -\nabla\varphi.$$

За допомогою спрощених рівнянь аналіз системи можна розглядати як електростатичний аналіз і проблему можна спростити до прогнозування електричного поля, створюваного різними розподілами заряду для різних матеріалів і зразків при випробуванні. При цьому використовується рівняння Пуассона, яке приймає форму

$$\nabla(\varepsilon_0\varepsilon\nabla\varphi) = \rho. \quad (2.1)$$

У більшості практичних випадків вільні заряди в об'ємі, де існує випробовуване поле (із зразками - діелектриками) відсутні. Таким чином, розподіл густину заряду ρ дорівнює нулю, і рівняння (2.1) зводиться до рівняння Лапласа

$$\nabla(\varepsilon_0\varepsilon\nabla\varphi) = 0.$$

Розподіл електричного потенціалу φ може бути отриманий шляхом вирішення рівняння Лапласа.

2.2 Властивості об'єкта контролю

Під час розв'язання задач контролю важливо знати електричні властивості ОК, такі як електропровідність і діелектрична проникність, які впливають на вимірюваний сигнал. Для провідників електричні властивості (насамперед провідність) мають мінімальний вплив на вимірюваний сигнал. Для діелектриків і слабких провідників електричні властивості (насамперед, діелектричну проникність) значно впливають на вимірюваний сигнал [102].

При застосуванні зовнішнього електричного поля до діелектричного матеріалу, в якому кількість вільного заряду дуже мала (тобто, наближається до нуля в рівнянні Лапласа), матеріал буде поляризовано і атоми матеріалу утворюють електричні диполі, які підтримують електричне поле, і яке намагається протидіяти прикладеному полю. Для лінійного і ізотропного матеріалу густина поляризації, пов'язана із напругою зовнішнього електричного поля, виражається таким чином

$$\bar{P} = \varepsilon_0 \chi_e \bar{E},$$

де \bar{P} – поляризованість, Кл/м²;

χ_e – електрична сприйнятливність матеріалу.

Електрична індукція \bar{D} пов'язана з поляризованістю \bar{P} в такий спосіб

$$\bar{D} = \varepsilon_0 \bar{E} + \bar{P} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \bar{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \bar{E}. \quad (2.2)$$

Проте, рівняння (2.2) застосовується для статичного випадку. Під час змін в часі електричне поле залежить від частоти, і відповідно у частотній області діелектричного матеріалу може бути записана як

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'',$$

де ε' – дійсна частина ε (діелектрична проникність);

ε'' – уявна частина ε (коефіцієнт втрат).

Оскільки усі матеріали мають кінцеву електропровідність σ , більш загальний вигляд діелектричної проникності можна записати у вигляді

$$\varepsilon_{\text{еф}} = \varepsilon' - j \left(\varepsilon'' - \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right), \quad (2.3)$$

де ω – кутова частота прикладеного електричного поля, рад/с.

З рівняння (2.3) видно, що діелектрична проникність матеріалу залежить від частоти. Деякі механізми, пов'язані з релаксацією є об'єктами досліджень [103-105]. При квазістатичному припущенні діелектричні втрати $\varepsilon'' = 0$ та $\varepsilon' = \varepsilon$. Рівняння (2.3) можна записати як

$$\varepsilon_{\text{ef}} = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}.$$

Значення провідності ізоляційних матеріалів, як правило, дуже мале, відносна статична діелектрична проникність ε є хорошим наближенням для характеристики таких матеріалів [106].

Ємність – це здатність структури накопичувати електричний заряд. Також це міра кількості збереженої електричної енергії даного електричного потенціалу. Згідно загальноприйнятого визначення, ємність – це відношення між зарядом на індукторі i та напруги між провідником j . Сумарний заряд q на провіднику i , що індукується усіма іншими провідниками – це сума окремо індукованих зарядів [107]. Для геометрії, показаної на рис. 1.1, a

$$q = CV,$$

де q – заряд, Кл;

C – ємність пластин, Ф;

V – напруга, В.

Для вимірювання малих значень ємності з високою точністю необхідно використання мостових схем вимірювання ємності, які мають високу чутливість, велику точність, широкий діапазон вимірюваних значень ємності.

2.3 Мостові методи вимірювання ємності

Для вимірюванні ємності використовують мостові схеми змінного струму. Кожний опір плеча моста (рис. 2.1) може містити активну, індуктивну і

ємнісну складові. В одну діагональ моста включається джерело живлення, а в іншу - індикатор рівноваги або вольтметр, що дозволяє виявити проходження струму в цій діагоналі або появу між відповідними вузлами різниці потенціалів.

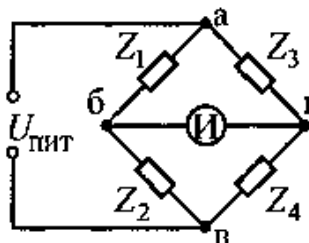


Рисунок 2.1 – Схема 4-плечого вимірювального моста змінного струму

Широке застосування мостових методів обумовлено великою точністю вимірювання, високою чутливістю і можливістю вимірювання різних величин. В основі роботи вимірювальних мостів закладений або диференційний, або нульовий методи вимірювання. При диференційному методі на індикатор в мостовій схемі впливає різниця значень вимірюваної величини і відомої величини, що відтворюється мірою, і міст працює в так званому неврівноваженому або незбалансованому режимі. При нульовому методі результуючий ефект впливу на індикатор вимірюваного опору і опору, відтвореного мірою, доводять до нуля і міст працює в урівноваженому або збалансованому режимі.

Вимірювальні мости розрізняють за родом струму джерела живлення і видом схемного виконання.

Мости постійного струму поділяють на двоплечеві, одинарні (чотирьохплечові) і подвійні (шестиплечові). Індикаторами рівноваги в них найбільш часто є вимірювальні механізми магнітоелектричної системи (гальванометри). Мости змінного струму поділяються на одинарні, подвійні, Т-образні.

За характером опору плечей мости бувають з індуктивними і безіндуктивними зв'язками, а за впливом частоти – частотонезалежні (їх рівновага не залежить від частоти напруги живлення) та частотозалежні

(рівновага залежить від частоти напруги живлення). Індикаторами рівноваги в них найбільш часто є електронні прилади.

Для забезпечення балансу моста необхідно і достатньо виконання рівності

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_4 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_3.$$

Комплексні опори плечей мають вигляд

$$\dot{Z}_1 = R_1 + jx_1,$$

$$\dot{Z}_2 = R_2 + jx_2,$$

$$\dot{Z}_3 = R_3 + jx_3,$$

$$\dot{Z}_4 = R_4 + jx_4.$$

рівняння балансу моста може бути представлено

$$R_1 R_4 - x_1 x_4 = R_2 R_3 - x_2 x_3,$$

$$R_1 x_4 + R_4 x_1 = R_2 x_3 + R_3 x_2.$$

При представленні комплексних опорів плечей у вигляді

$$\dot{Z}_1 = z_1 e^{j\phi_1},$$

$$\dot{Z}_2 = z_2 e^{j\phi_2},$$

$$\dot{Z}_3 = z_3 e^{j\phi_3},$$

$$\dot{Z}_4 = z_4 e^{j\phi_4}.$$

де z_1, z_2, z_3, z_4 – модулі повних опорів плечей; $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ – фазові кути.

Рівняння балансу моста має вигляд

$$z_1 e^{j\phi_1} z_4 e^{j\phi_4} = z_2 e^{j\phi_2} z_3 e^{j\phi_3},$$

що еквівалентно виконанню двох рівнянь

$$z_1 z_4 = z_2 z_3,$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Необхідність виконання двох рівностей означає, що балансування моста змінного струму можна здійснити шляхом регулювання не менше двох параметрів: модуля і фазового кута будь-якого плеча. Умова забезпечення рівності сум фазових кутів протилежних плечей вказує на специфіку розташування плечей моста. Якщо суміжні плечі, наприклад третє і четверте, мають чисто активні опори, то два інших суміжних плеча повинні мати обидва, або індуктивний, або ємнісний характер. Якщо протилежні плечі чисто активні, то одне з двох інших плечей повинно бути індуктивним, а інше - ємнісним.

Зрівноваження мостів при вимірюванні потребує складних багатоступінчастих алгоритмів (почергової зміни як активної компоненти, так і реактивної), що ускладнює апаратне виконання та значно збільшує час вимірювання. Крім того, існують обмеження використання мостових схем для знаходження локальних дефектів в об'єкті контролю (несуцільностей, нерівномірностей поверхні, тощо), а час пошуку одного дефекту є зовеликим, що робить практично неможливим діагностику ОК на предмет наявності дефектів.

Теоретично, вимірювання ємності, як правило, прийнято або в гармонічному режимі, або в статичному режимі між щонайменше двома електростатичними рівновагами [108-110]. Щоб здійснити такого роду вимірювання, електроди ємнісного сенсора можуть бути підключеними до опорної напруги. Для пропонованого методу, сенсор, як правило, включає в себе два активних електроди: випромінюючий та приймаючий, один з електродів керується відомою напругою, а вимірювання здійснюється на іншому електроді.

Отже, для визначення ємності необхідно вимірювати коефіцієнт перетворення, тобто, застосування електричного збудження (відомої напруги або струму) випромінюючого електрода і отримання реакції від приймаючого електрода [111].

Пропонується вимірювати не тільки модуль коефіцієнту перетворення, а і вимірювати амплітуду і фазовий зсув сигналу на виході.

2.4 Критерії оцінки роботи сенсора

Для оцінки ефективності роботи сенсорів як основні критерії використовуються такі величини, як глибина проникнення електричного поля (далі глибина проникнення), чутливість вимірювання і роздільна здатність.

Глибина проникнення є мірою того, наскільки глибоко електричне поле може проникати в зразок. При застосуванні методу, для якого дійсним є квазістатичне припущення, глибина проникнення електричного поля в даному матеріалі визначається двома факторами: діелектричною проникністю матеріалу і структурою електродів. Напруженість електричного поля зменшується в матеріалах з високою діелектричною проникністю, а у матеріалах з малою – збільшується. Тим не менш, основним чинником при визначенні глибини проникнення є геометрія як випромінюючого, так і приймаючого електродів [112].

Серед фахівців у НК немає спільної думки щодо визначення глибини проникнення для плоских ємнісних сенсорів через складність розподілу електричного поля і варіацію структури сенсора. Один із способів здійснення ефективної оцінки глибини проникнення – розмістити зразок під сенсором, а потім його переміщувати від поверхні і вимірювати ємність між випромінюючим і приймаючим електродами поки зміна значення ємності між двома послідовними вимірюваннями не буде відрізнятися менше, ніж на 3%.

Поріг 3% динамічного діапазону потім використовується для визначення глибини проникнення [113].

Глибина проникнення може бути визначена як глибина розташування дефекта, при якій досягається 99% загальної ємності.

Глибина проникнення сенсорів в значній мірі залежить як від структури електродів (розмір, форма і розташування), так і розподілу електричного поля між випромінюючим і приймаючим електродами для даного матеріалу.

Задля цілей НК, інформація, отримана за допомогою сенсора повинна мати достатню роздільну здатність, щоб визначити форму і розмір дефекту [114].

2.5 Основні схеми діагностики об'єкта контролю при застосуванні електроємнісного методу

2.5.1 Непровідний об'єкт контролю

Перша схема вимірювання – сенсор з непровідним зразком, як зображено на рис. 2.2.

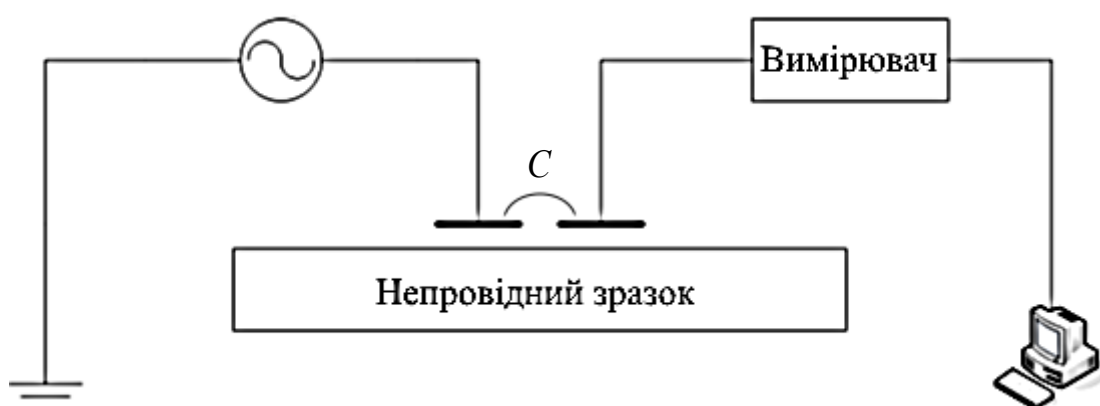


Рисунок 2.2 – Схема системи «ємнісний сенсор-ОК» для дослідження непровідних зразків

Варіації діелектричної проникності матеріалу ОК в межах ємності досліджуваної за допомогою поля (наприклад, різні відстані, вм'ятина на поверхні, порожнеча під поверхнею або іншими формами дефектів) призведуть до зміни ємності.

2.5.2 Непровідний об'єкт контролю із заземленою підкладкою

Друга схема вимірювання – непровідний зразок між сенсором і заземленою підкладкою, як показано на рис. 2.3.

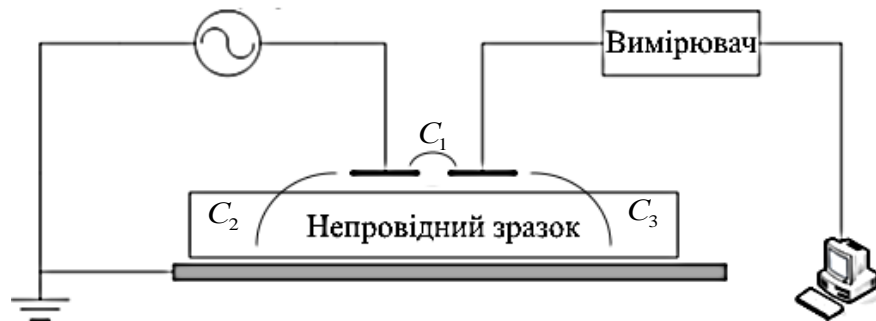


Рисунок 2.3 – Схема дослідження непровідних зразків між сенсором і заземленою підкладкою

У цьому випадку, якщо непровідний зразок не є дуже товстим для здійснення відповідного впливу заземленої підкладки, остання виступатиме в якості третього паралельно розташованого протилежного електрода. Це створить додатковий плоский конденсатор з кожного електрода до заземленої підкладки (рис. 2.4).

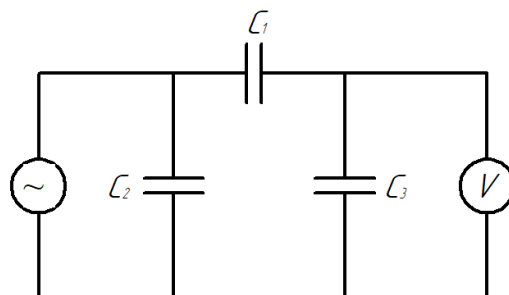


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема дослідження непровідних зразків між сенсором і заземленою підкладкою

У якості паралельних конденсаторів, ці два конденсатора не будуть чутливими до положення зразка та можливих дефектів (якщо відстань між поверхнею сенсора і заземленою підкладки фіксовано). Тим не менш, ємність між випромінюючим і приймаючим електродами, як і раніше буде чутлива до робочого зазору та положення/розміру можливих дефектів.

2.5.3 Провідний об'єкт контролю

Третім способом вимірювання є сенсор із заземленим провідним випробуваним зразком, що зображено на рис. 2.5.

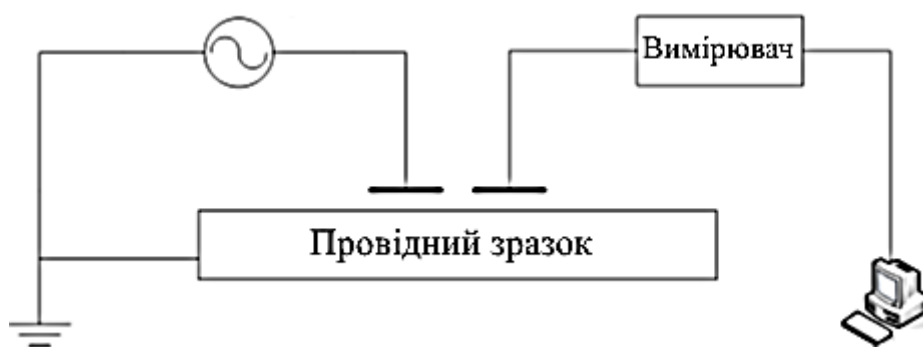


Рисунок 2.5 – Схема дослідження заземлених провідних зразків

У цьому випадку близькість провідної і заземленої поверхні зразка діятиме у якості третього, паралельного протилежного електрода і знову створить додатковий плоский конденсатор з кожного електроду до заземленої поверхні. Варіації відстані між електродами і заземленою поверхнею (зміни робочого зазору та/або поверхневих характеристик) змінить ємність [115]. Для ємності між випромінюючим і приймаючим електродами, через так званого ефекту екранування, сенсор наближається в якості заземленої поверхні, все більше окантовуючи лінії електричного поля від випромінюючого електрода, більш ймовірно закінчиться на заземленій металевій поверхні, ніж перейде на

приймаючий електрод. Таким чином, приймаючий електрод також чутливий до відстані між електродами і заземленою поверхнею (робочий зазор).

2.6 Еквівалентна схема вимірювання

Як було зазначено вище використання ємнісного методу потребує зменшення площі сенсорів, що призводить до зменшення значень ємності. Вимірювання малих значень ємності з високою точністю потребує, в свою чергу, використання спеціальних методів з великим часом вимірювання, що може бути неприпустимо при скануванні об'єкта або під час неперервного виробничого процесу.

Сучасний стан розвитку електроніки дозволяє підвищити швидкодію вимірювання ємності з достатньо високою точністю і визначати ємність через визначення комплексного коефіцієнту передачі.

Запропоновано вимірювальний перетворювач представити у вигляді еквівалентної схеми (рис. 2.6) і визначати ємність через визначення комплексного коефіцієнту перетворення.

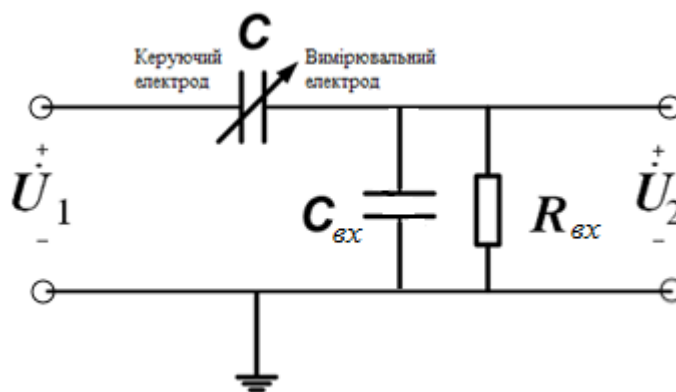


Рисунок 2.6 – Еквівалентна електрична схема вимірювального перетворювача

На рис. 2.6: $C_{вх}$ – вхідна ємність підсилювача заряду.

Коефіцієнт передачі перетворювача визначається

$$\dot{K} = \frac{\dot{Z}_{\text{ex}}}{\dot{Z} + \dot{Z}_{\text{ex}}},$$

де $\dot{Z} = -\frac{j}{\omega C}$ – опір ємнісного перетворювача;

$$\dot{Z}_{\text{ex}} = \frac{\dot{Z}_C R_{\text{ex}}}{\dot{Z}_C + R_{\text{ex}}} \text{ – вхідний опір підсилювача;}$$

$$\dot{Z}_C = -\frac{j}{\omega C_{\text{ex}}}.$$

Коефіцієнт передачі в алгебраїчній формі

$$\begin{aligned} \dot{K} &= \frac{\dot{Z}_{\text{ex}}}{\dot{Z} + \dot{Z}_{\text{ex}}} = \frac{\frac{R_{\text{ex}}}{j\omega R_{\text{ex}} C_{\text{ex}} + 1}}{\frac{1}{j\omega C} + \frac{R_{\text{ex}}}{j\omega R_{\text{ex}} C_{\text{ex}} + 1}} = \frac{R_{\text{ex}}}{\frac{j\omega R_{\text{ex}} C_{\text{ex}} + 1}{j\omega C} + R_{\text{ex}}} = \frac{j\omega R_{\text{ex}} C}{1 + j\omega R_{\text{ex}} (C + C_{\text{ex}})} = \\ &= \frac{j\omega R_{\text{ex}} C}{1 + j\omega R_{\text{ex}} (C + C_{\text{ex}})} \frac{1 - j\omega R_{\text{ex}} (C + C_{\text{ex}})}{1 - j\omega R_{\text{ex}} (C + C_{\text{ex}})} = \frac{\omega^2 R_{\text{ex}}^2 C (C + C_{\text{ex}}) + j\omega R_{\text{ex}} C}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2} = \\ &= \frac{\omega R_{\text{ex}} C (\omega R_{\text{ex}} (C + C_{\text{ex}}) + j)}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2} = \\ &= \frac{C \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2} + \frac{C \omega R_{\text{ex}}}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2} j \end{aligned}$$

Переведемо коефіцієнт передачі у показову форму

$$\text{tg } \varphi = \frac{\text{Im } \dot{K}}{\text{Re } \dot{K}} = \frac{\frac{C \omega R_{\text{ex}}}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2}}{\frac{C \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2}} = \frac{C \omega R_{\text{ex}}}{C \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})} = \frac{1}{\omega R_{\text{ex}} (C + C_{\text{ex}})}$$

$$\begin{aligned}
|\dot{K}| &= \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{K})^2 + (\operatorname{Im} \dot{K})^2} = \\
&= \sqrt{\left(\frac{C\omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2} \right)^2 + \left(\frac{C\omega R_{\text{ex}}}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2} \right)^2} = \\
&= \sqrt{\frac{C^2 \omega^4 R_{\text{ex}}^4 (C + C_{\text{ex}})^2 + C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2}{\left(1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2 \right)^2}} = \sqrt{\frac{C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2 \left(1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2 \right)}{\left(1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2 \right)^2}} = \\
&= \sqrt{\frac{C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2}{1 + \omega^2 R_{\text{ex}}^2 (C + C_{\text{ex}})^2}} = \sqrt{\frac{C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2}{C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2 + 2C\omega^2 C_{\text{ex}} R_{\text{ex}}^2 + \omega^2 C_{\text{ex}}^2 R_{\text{ex}}^2 + 1}}
\end{aligned}$$

Після переведення коефіцієнту передачі у показову форму вираз має вигляд [116]

$$\dot{K} = \sqrt{\frac{C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2}{C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2 + 2C\omega^2 C_{\text{ex}} R_{\text{ex}}^2 + \omega^2 C_{\text{ex}}^2 R_{\text{ex}}^2 + 1}} e^{\operatorname{atan}\left(\frac{1}{\omega R_{\text{ex}} (C + C_{\text{ex}})}\right)}.$$

Враховуючи, що для даного перетворювача пропонується вхідний підсилювач вбудувати безпосередньо в сенсор (без використання з'єднувального кабелю) для підключення, то прийmemo $C_{\text{вх}} = 0,5$ пФ (типове значення вхідної електроємності для підсилювача заряду становить 0,5 пФ, наприклад для AD4422). Вхідний опір підсилювача заряду по постійному струму $R_{\text{вх}}$ прийmemo рівним його типовому значенню 100 МОм.

З метою визначення чутливості схеми при різних робочих частотах було здійснено дослідження залежності модуля коефіцієнту передачі від робочої частоти. Оскільки ємність сенсора може змінюватися в залежності від умов контролю та наявності або відсутності дефектів у матеріалі дослідження було проведено з різними значеннями ємності сенсора, в діапазоні значень від 0,5 пФ до 2 пФ.

На рис. 2.7 зображено залежність модуля коефіцієнту передачі від робочої частоти (амплітудно-частотну характеристику схеми) при різних

значеннях ємності сенсора. Аналіз даної залежності дозволить визначити чутливість схеми.

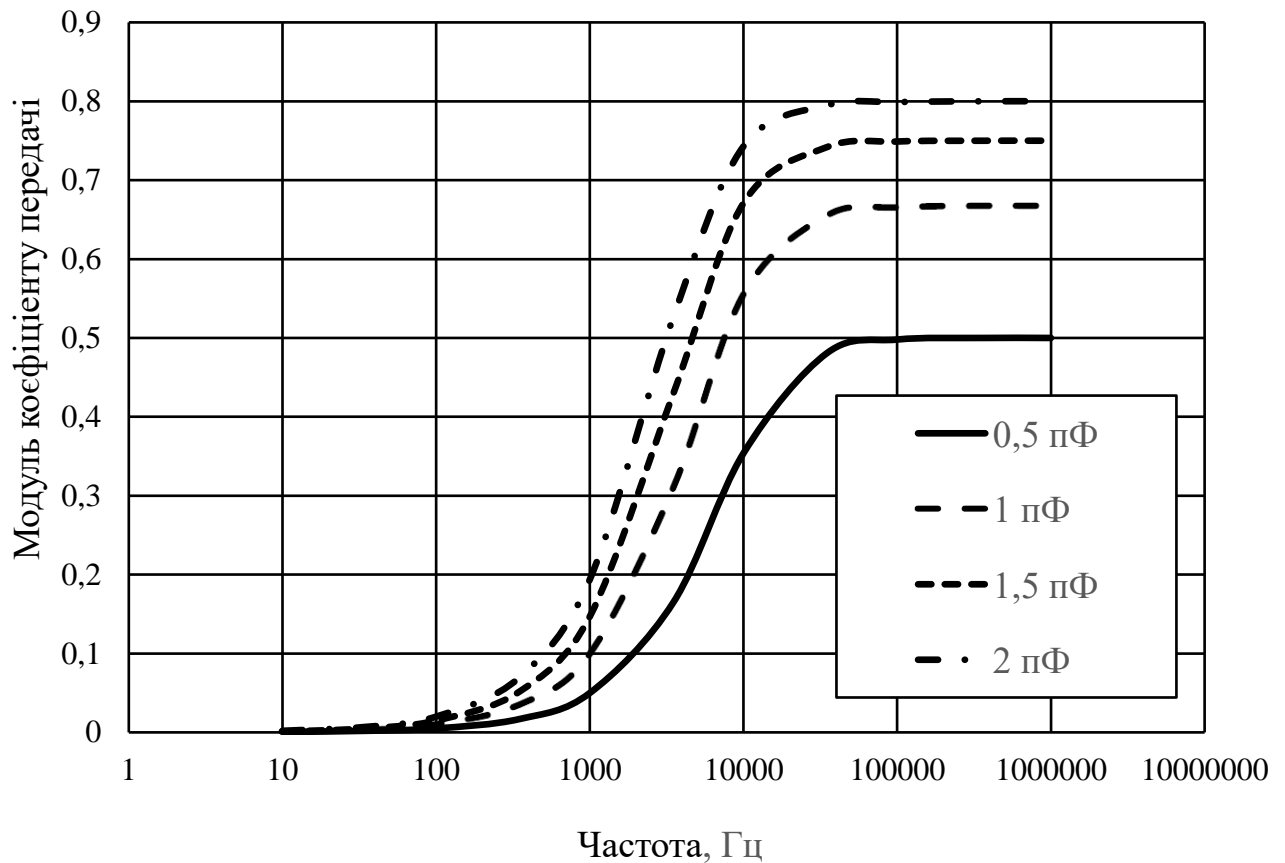


Рисунок 2.7 – Амплітудно-частотна характеристика схеми при різних значеннях ємності сенсора

Як видно з рис. 2.7 зміна ємності сенсора призводить до суттєвої зміни модуля коефіцієнту передачі.

Для знаходження робочої частоти максимальної чутливості схеми за амплітудою знайдемо третю похідну функції АЧХ

$$\frac{d^3}{d\omega^3} K(ACH) = 3R_{ex}^2 (C + C_{ex})^2 \sqrt{\frac{C^2 \omega^2 R_{ex}^2}{C^2 \omega^2 R_{ex}^2 + 2C\omega^2 C_{ex} R_{ex}^2 + \omega^2 C_{ex}^2 R_{ex}^2 + 1}} \times$$

$$\times \frac{4C^2 \omega^2 R_{ex}^2 + 8C\omega^2 C_{ex} R_{ex}^2 + 4\omega^2 C_{ex}^2 R_{ex}^2 - 1}{\omega (C^2 \omega^2 R_{ex}^2 + 2C\omega^2 C_{ex} R_{ex}^2 + \omega^2 C_{ex}^2 R_{ex}^2 + 1)^3}$$

Отримане рівняння дозволяє визначити значення робочої частоти, за якої чутливість схеми за амплітудою максимальна.

Графік третьої похідної функції АЧХ при різних значеннях ємності сенсора зображено на рис. 2.8.

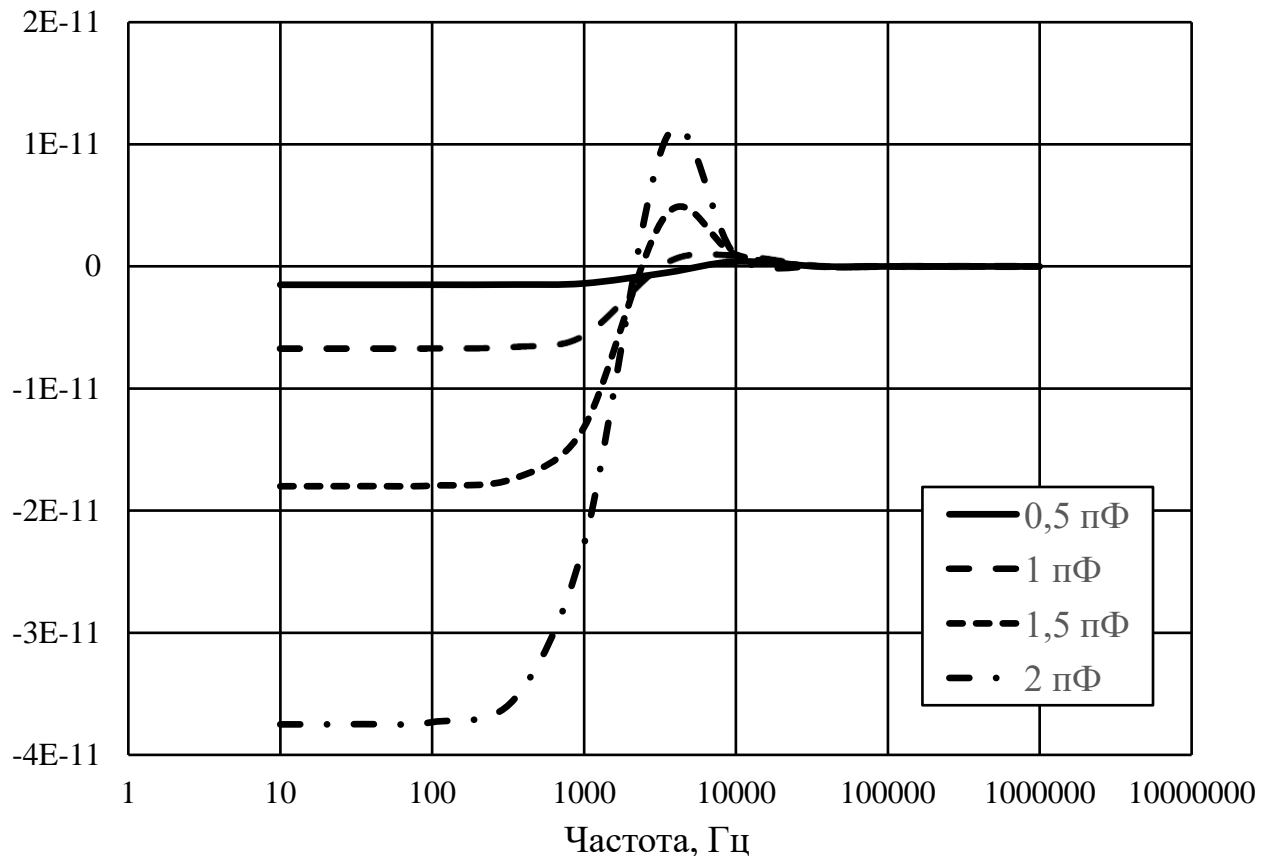


Рисунок 2.8 – Залежність третьої похідної АЧХ від частоти при різних значеннях ємності сенсора

Прирівнявши $\frac{d^3}{d\omega^3} K(ACH) = 0$ знайдемо частоту, за якої чутливість схеми за амплітудою максимальна. Як видно з рис. 2.8 криві за різних значень ємності сенсора перетинають 0 у діапазоні робочих частот від 1000 до 5000 Гц.

Визначивши значення частот за яких $\frac{d^3}{d\omega^3} K(ACH) = 0$ можливо визначити залежність робочої частоти найбільшої чутливості схеми від значення ємності сенсора.

Частоти максимальної чутливості схеми за амплітудою при різних значеннях ємності сенсора наведено на рис. 2.9.

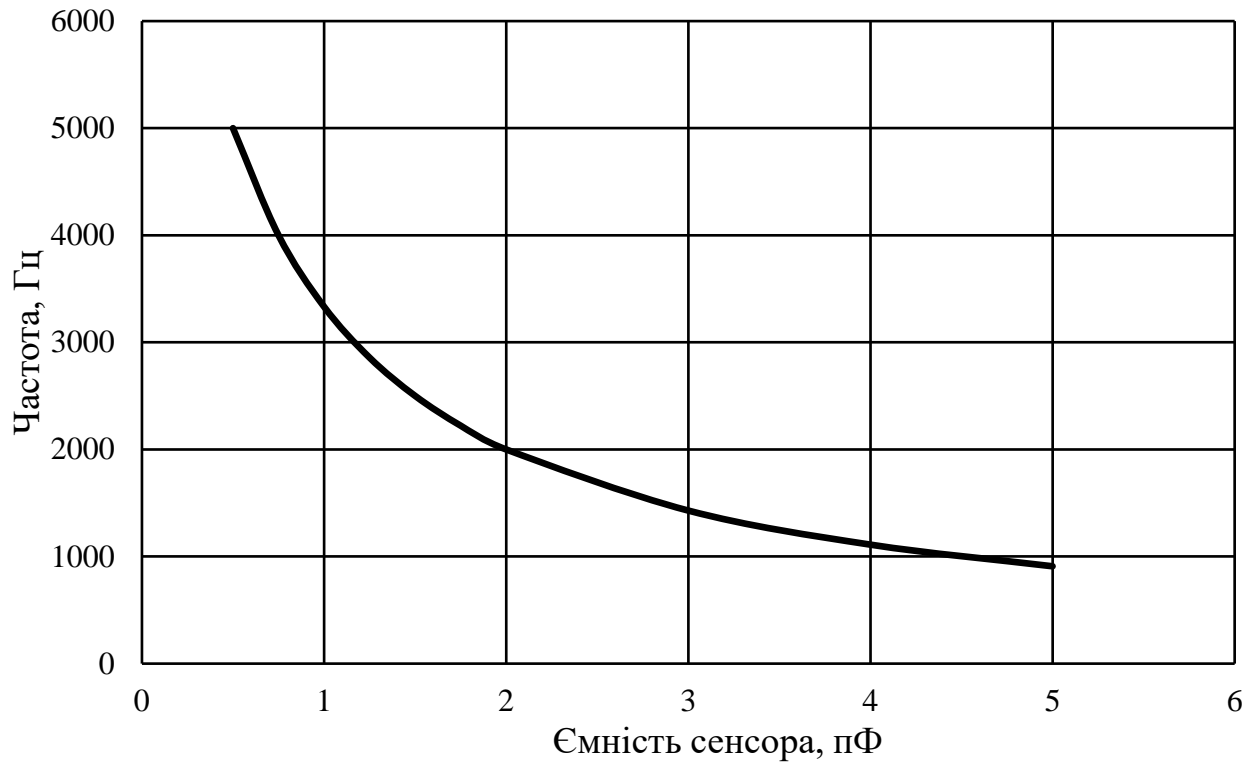


Рисунок 2.9 – Залежність частоти максимальної чутливості схеми від початкової ємності сенсора

Як видно з рис. 2.9 залежність частоти максимальної чутливості схеми від початкової ємності сенсора має степеневий характер.

Виконавши апроксимацію залежності, наведеної на рис. 2.9, отримано залежність, що описується виразом

$$\omega_{\max}(ACH) = 3247,5 \cdot C^{-0,75} \text{ Гц/пФ},$$

де C – ємність сенсора [пФ], при величині достовірності апроксимації $R^2 = 0,99$.

Отримана залежність дозволяє визначати частоту, за якої чутливість схеми є максимальною за амплітудою без проведення моделювання або натурального експерименту.

На рис. 2.10 зображено фазо-частотну характеристику схеми при різних значеннях ємності сенсора.

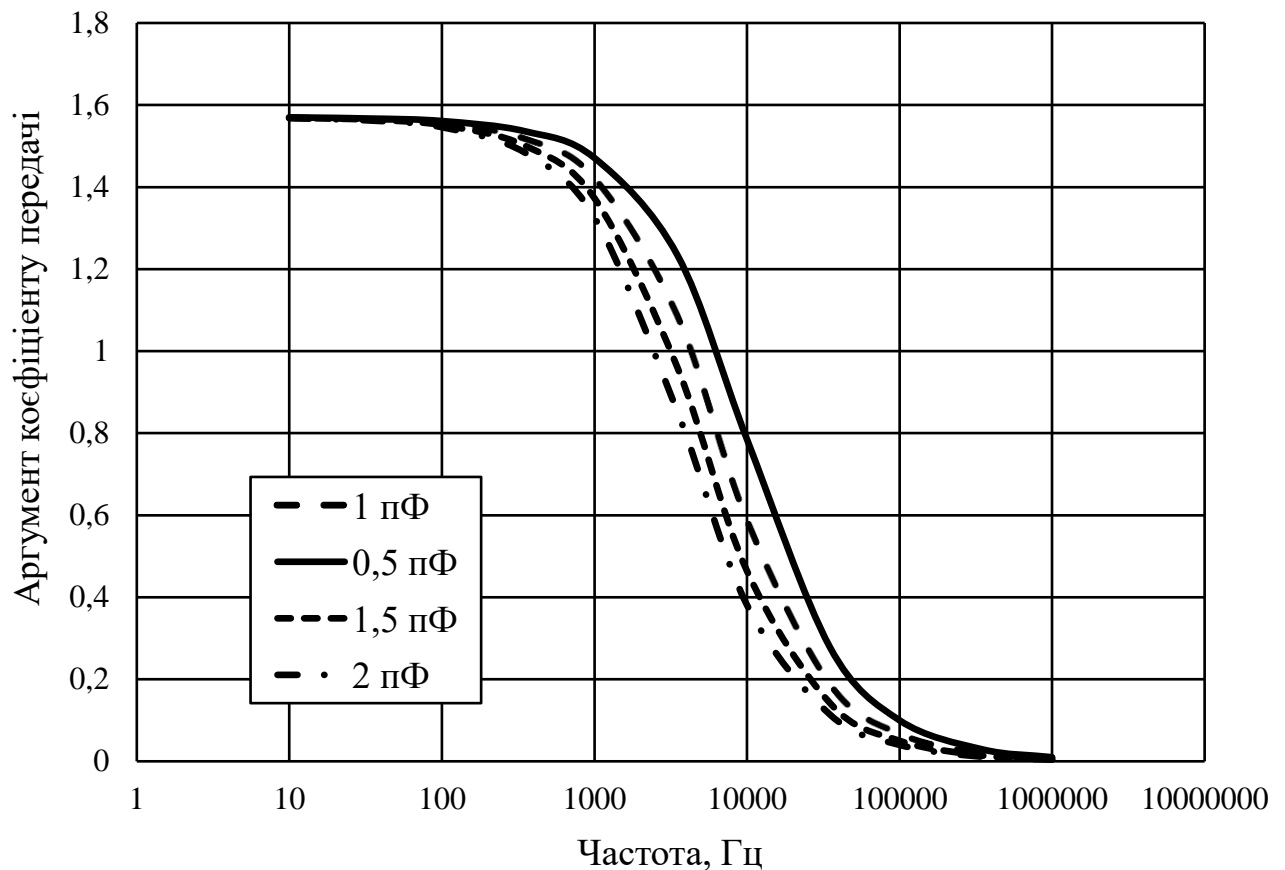


Рисунок 2.10 – Фазо-частотна характеристика схеми при різних значеннях ємності сенсора

Як видно з рис. 2.10 зміна ємності сенсора призводить до зміни аргументу коефіцієнту передачі.

Для знаходження робочої частоти максимальної чутливості схеми за фазою знайдемо третю похідну функції ФЧХ

$$\frac{d^3}{d\omega^3} K(\Phi_{\text{ЧХ}}) = - \frac{2R_{\text{ex}}^3 (C + C_{\text{ex}})^3 (3C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2 + 6C \omega^2 C_{\text{ex}} R_{\text{ex}}^2 + 3\omega^2 C_{\text{ex}}^2 R_{\text{ex}}^2 - 1)}{(C^2 \omega^2 R_{\text{ex}}^2 + 2C \omega^2 C_{\text{ex}} R_{\text{ex}}^2 + \omega^2 C_{\text{ex}}^2 R_{\text{ex}}^2 + 1)^3}.$$

Отримане рівняння дозволяє визначити значення робочої частоти, за якої чутливість схеми за фазою максимальна.

Графік третьої похідної функції ФЧХ при різних значеннях ємності сенсора зображено на рис. 2.11.

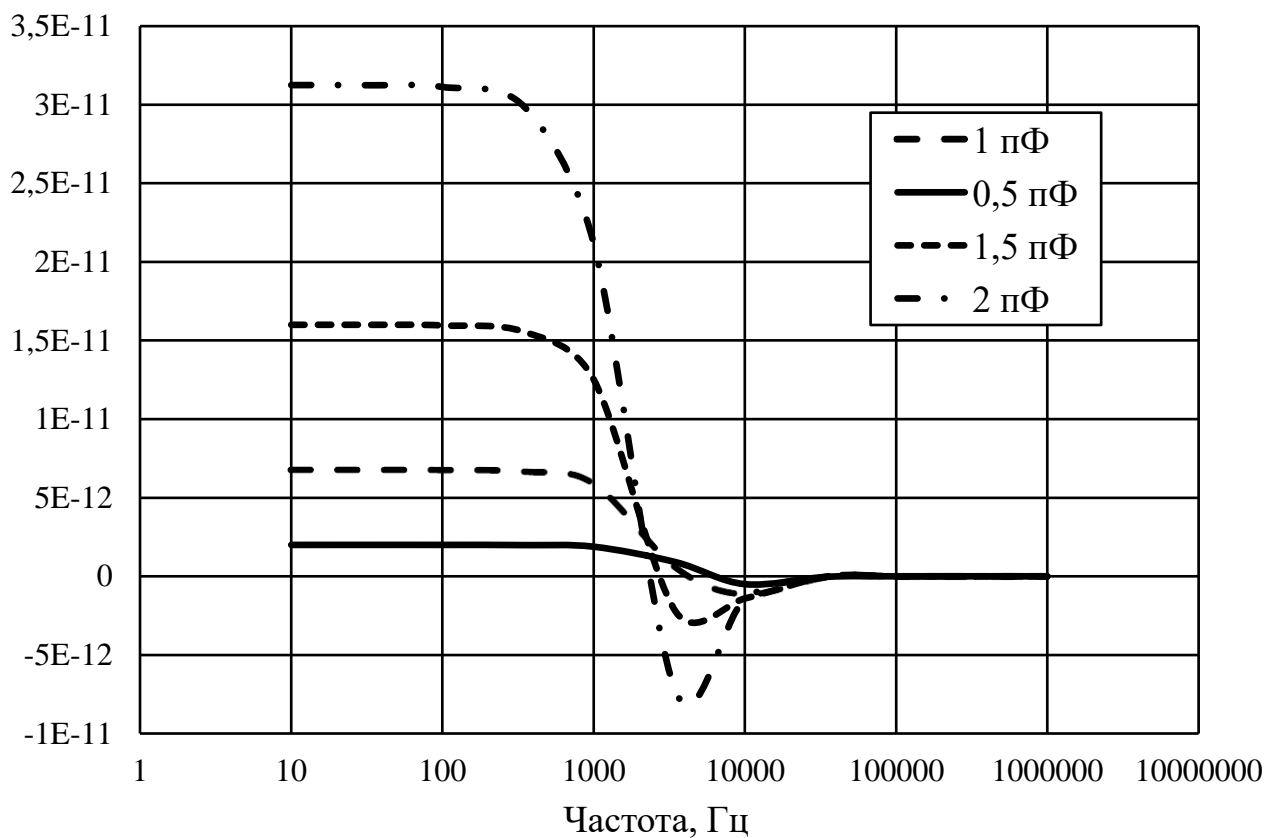


Рисунок 2.11 – Залежність третьої похідної ФЧХ від частоти при різних значеннях ємності сенсора

Прирівнявши $\frac{d^3}{d\omega^3} K(\Phi_{\text{ЧХ}}) = 0$ знайдемо частоту, за якої чутливість

схеми за фазою максимальна. Як видно з рис. 2.11 криві за різних значень ємності сенсора перетинають нульове значення у діапазоні робочих частот від 1000 до 6000 Гц. Таким чином, робочі частоти максимальної чутливості за

амплітудою та фазою знаходяться у однакових діапазонах, що дозволить налаштовувати систему на максимальну чутливість одразу за амплітудою та фазою.

Визначивши значення частот за яких $\frac{d^3}{d\omega^3} K(\Phi\chi) = 0$ можливо визначити залежність робочої частоти найбільшої чутливості схеми від значення ємності сенсора.

Частоти максимальної чутливості схеми за фазою при різних значеннях ємності сенсора наведено на рис. 2.12.

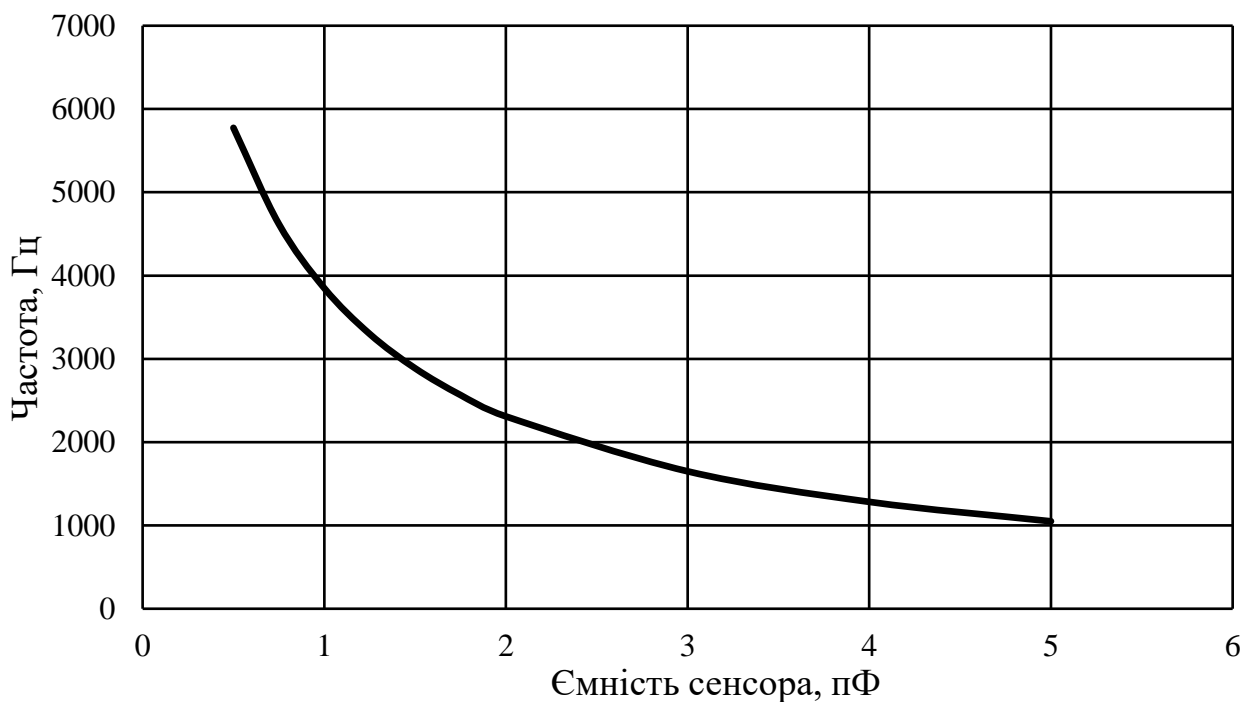


Рисунок 2.12 – Залежність частоти максимальної чутливості схеми від ємності сенсора

Як видно з рис. 2.12 залежність частоти максимальної чутливості схеми від початкової ємності сенсора має степеневий характер.

Виконавши апроксимацію залежності, наведеної на рис. 2.12, отримано залежність, що описується виразом

$$\omega_{\max}(\Phi\text{ЧХ}) = 3750,1 \cdot C^{-0,75} \text{ Гц/пФ},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2 = 0,99$.

Отримана залежність дозволяє визначати частоту, за якої чутливість схеми є максимальною за фазою без проведення моделювання або натурного експерименту.

2.7 Визначення чутливості вимірювальної схеми

Для визначення чутливості схеми за амплітудою було досліджено залежність напруги на виході від ємності вимірювального сенсора, що зображено на рис. 2.13.

Варто зазначити, що в більшості практичних задач важливо вимірювати не абсолютне значення ємності, а приріст ΔC [117].

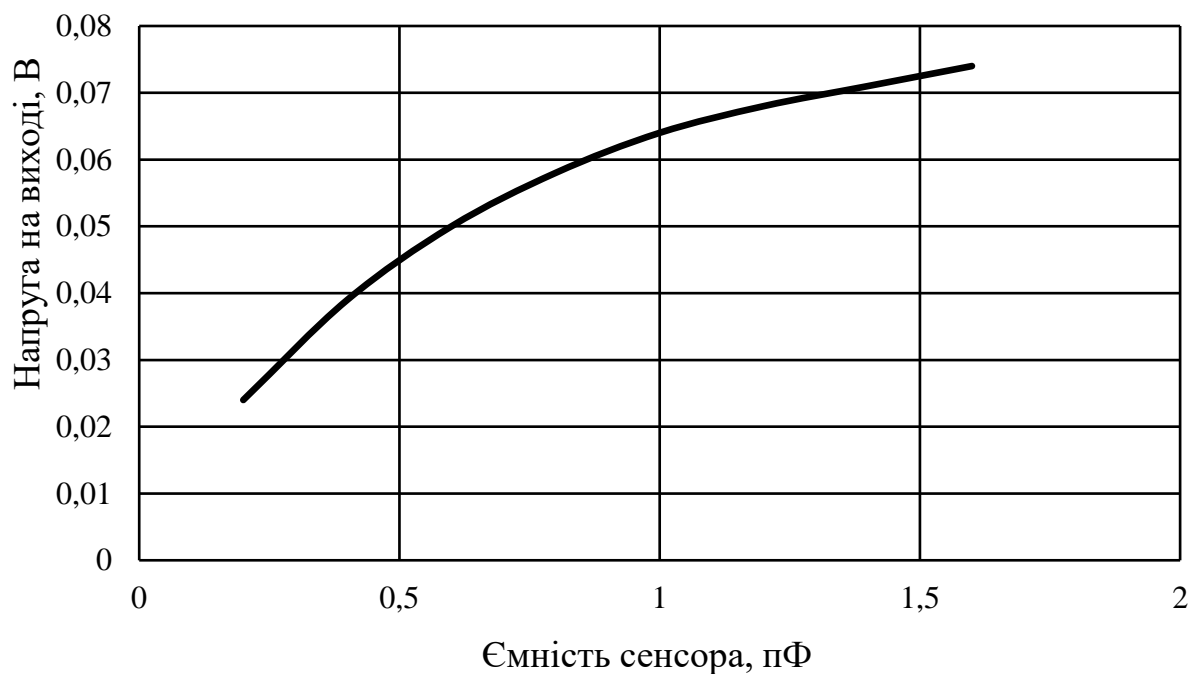


Рисунок 2.13 – Залежність напруги на виході від ємності вимірювального сенсора

З рис. 2.13 визначено чутливість системи за амплітудою, що склала

$$S_U = \frac{\Delta U}{\Delta C} = 3,4 \frac{мВ}{нФ}.$$

З урахуванням мінімально можливої роздільної здатності вимірювального приладу, наприклад $\Delta U = 1 мВ$, за допомогою схеми є можливість вимірювання зміни ємності у $\Delta C = 0,3 нФ$.

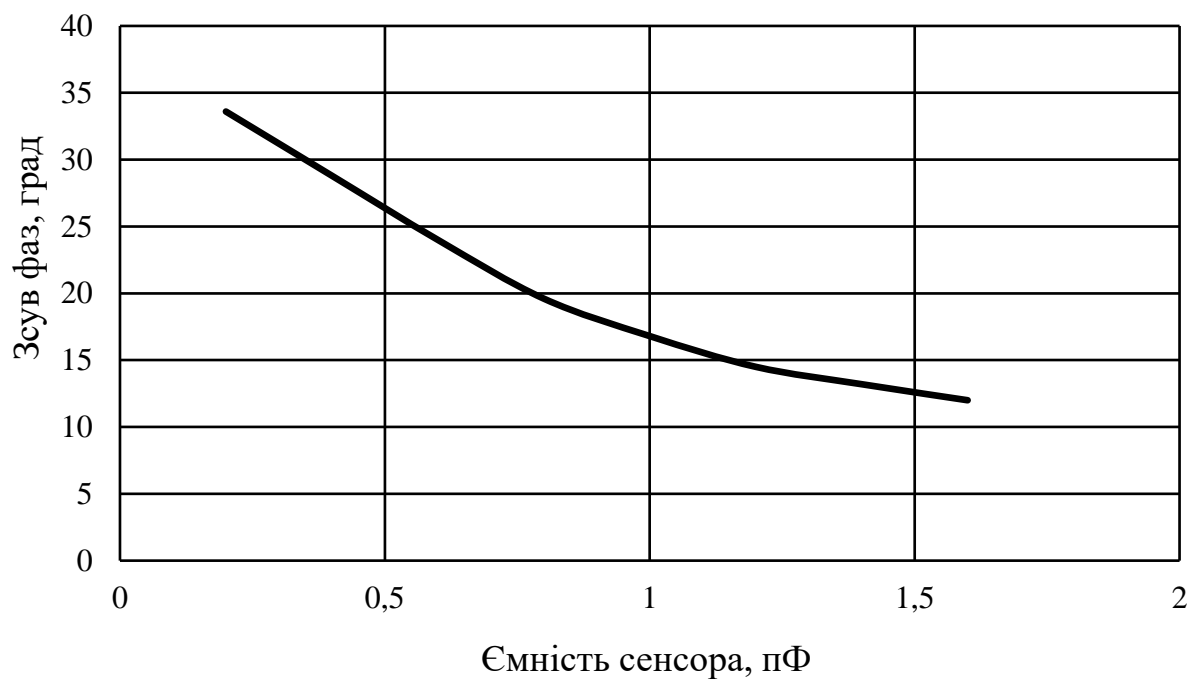


Рисунок 2.14 – Залежність фазового зсуву від ємності вимірювального сенсора

З рис. 2.14 визначено чутливість системи за фазою, що склала

$$S_\varphi = \frac{\Delta \varphi}{\Delta C} = 1,55 \frac{град}{нФ}.$$

З урахуванням мінімально можливої чутливості вимірювального приладу, наприклад $\Delta\varphi=0,3^\circ$, за допомогою схеми є можливість вимірювання зміни ємності у $\Delta C = 0,2n\Phi$.

Таким чином, можна зробити висновок, що чутливість за фазою є вищою.

Для знаходження мінімально можливого розміру електроду необхідно визначити ємність електродів при різних геометричних розмірах і конфігураціях [118].

Визначити значення ємності розгорнутого плоского конденсатора неможливо здійснити аналітичним шляхом. Тому, для визначення абсолютної величини електричної ємності сенсору було побудовано 3D модель, геометричні розміри якої зображено на рис. 2.15.

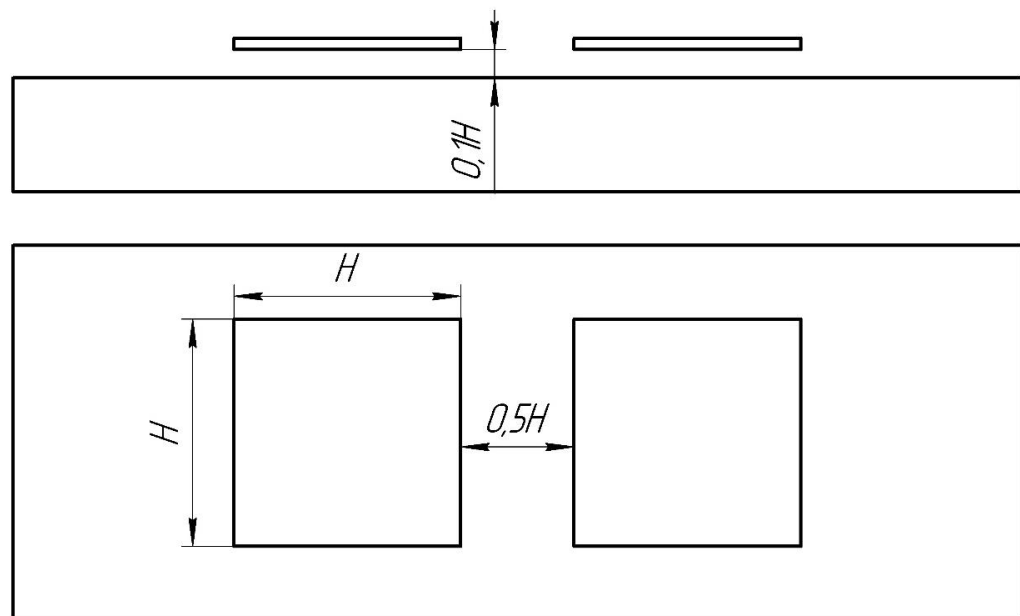


Рисунок 2.15 – Геометричне представлення 3D моделі

Для проведення контролю електроємнісним методом необхідно використовувати електроди, розміри яких співставляються з розміром дефекту. Проте, можливості вимірювання надмалих значень електричної ємності обмежені. Для визначення мінімально можливих розмірів електродів було

проведено дослідження з розмірами електродів від 5х5 мм до 35х35 мм, результати дослідження зображено на рис. 2.16.

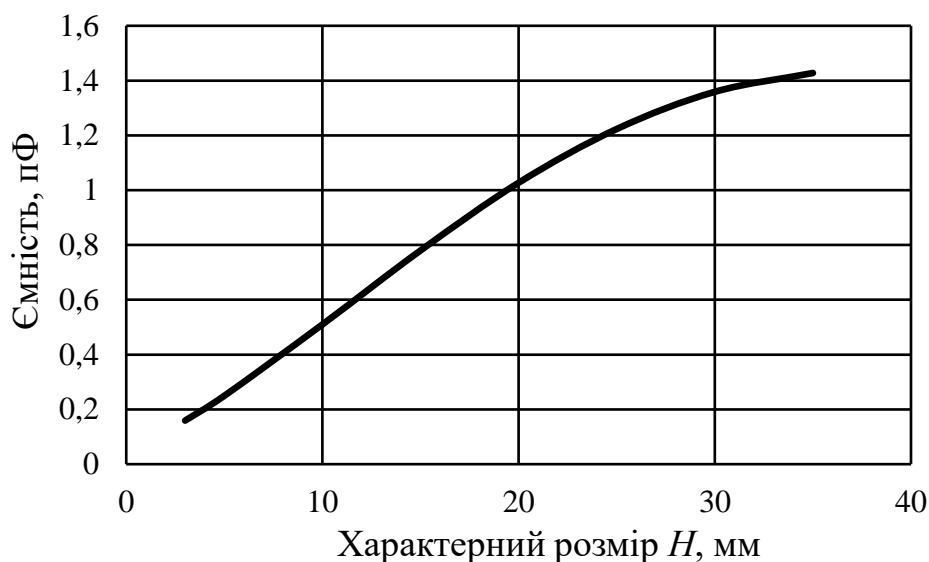


Рисунок 2.16 – Залежність ємності від характерного розміру електроду

Таким чином, враховуючи мінімально можливу зміну ємності, яка може бути виміряна за амплітудою $\Delta C = 0,3n\Phi$, з рис. 2.16 можливо знайти мінімальний розмір електроду, що становить 6х6 мм. Враховуючи мінімально можливу зміну ємності, яка може бути виміряна за фазою $\Delta C = 0,2n\Phi$, мінімальний розмір електроду становить 4х4 мм.

Висновки до розділу 2

У другому розділі отримано наступні результати:

1. Здійснено теоретичне обґрунтування системи «ємнісний сенсор - ОК» для електроємнісного методу контролю. Завдяки представленню системи як «квазістатичної» проблему можна спростити до електростатичного прогнозування електричного поля, створюваного різними розподілами заряду для різних матеріалів і зразків при випробуванні.

2. Доведено неможливість застосування мостових схем вимірювання ємності. Зрівноваження мостів при вимірюванні потребує складних багатоступінчастих алгоритмів, що ускладнює апаратне виконання та значно збільшує час вимірювання, що робить практично неможливим діагностику ОК на предмет наявності дефектів.

3. Запропоновано вимірювати не тільки модуль коефіцієнту перетворення, а й вимірювати амплітуду і фазовий зсув сигналу на виході.

4. Визначено робочі частоти максимальної чутливості схеми за амплітудою та фазою. Запропоновано метод визначення максимальної чутливості схеми за амплітудою та фазою при різних значеннях ємності сенсора без необхідності проведення моделювання або натурального експерименту.

5. За допомогою моделювання визначено залежність ємності від характерного розміру електроду, що дозволило встановити мінімально можливу величину електрода, за якої можливо зафіксувати зміну ємності при контролі, що склала 6х6 мм за амплітудою, та 4х4 мм за фазою.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Математична модель ємнісного сенсору

Математичне моделювання здійснювалось методом кінцевих елементів (МКЕ). Цей метод полягає у тому, що проблемна область моделі поділяється на ряд невеликих ділянок (елементів) типу простої структури. Потім елементи з'єднуються в дискретних точках (вузлах). Основні рівняння застосовуються до області одного елемента і отримують невідомі змінні у вузлах. При з'єднанні елементів один з одним за допомогою вузлів, можна визначити поведінку елементів на усій проблемній ділянці.

Щоб застосувати МКЕ до ємнісних сенсорів, в першу чергу треба розглянути опорні рівняння. По суті, електромагнітні явища регулюються рівняннями Максвелла. У загальному, матеріали, що мають як діелектричні, так і провідні властивості, регулюються рівняннями Максвелла-Ампера [119]

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}. \quad (3.1)$$

Для усунення напруженості магнітного поля H , розбіжність обох сторін рівняння (3.1) береться, як

$$\nabla \cdot \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right) = 0. \quad (3.2)$$

Частоти, що використовуються в ємнісних сенсорах, як правило, лежать в області між 1 кГц і 1 МГц. На таких частотах індуктивними явищами можна знехтувати і електромагнітне поле можна розглядати як квазістатичне

електричне поле. Можна припустити, що похідною за часом щільності магнітного потоку B можна знехтувати, і згідно закону Фарадея електричне поле E є вільним для звертання

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0. \quad (3.3)$$

На основі рівняння (3.3), електричне поле E можна описати за допомогою електричного скалярного розподілу потенціалу $\varphi(x, y, z)$, так що розподіл електричного потенціалу $\varphi(x, y, z)$, може бути представлений як

$$\bar{E} = -\nabla \varphi(x, y, z),$$

використовуючи конститутивні співвідношення

$$\begin{aligned} \bar{J} &= \sigma(x, y, z) \bar{E}, \\ \bar{D} &= \varepsilon(x, y, z) \bar{E}. \end{aligned}$$

Вираз (3.2) набуває виду

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] + \nabla \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] \right\} = 0, \quad (3.4)$$

де $\sigma(x, y, z)$ – розподіл провідності;

$\varepsilon(x, y, z)$ – розподіл діелектричної проникності.

Якщо відомо розподіл провідності і діелектричної проникності, розподіл електричного потенціалу $\varphi(x, y, z)$ можна отримати шляхом рішення рівняння (3.4). Але на практиці, через похідну за часом зв'язку між діелектричними та провідними властивостями, рівняння (3.4) не може бути вирішено. Практичний спосіб вирішення цієї проблеми полягає у розгляді системи як "переважно діелектричної" або "переважно провідної". У першому випадку рівняння (3.4) можна спростити до рівняння Лапласа

$$\nabla \cdot [\varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = 0.$$

У випадку "переважно провідної" системи, рівняння має вигляд

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = 0.$$

Використовуючи зазначене вище квазістатичне припущення, можна застосовувати метод кінцевих елементів для вирішення вищевказаних рівнянь, і визначити розподіл потенціалу $\varphi(x, y, z)$, спричинений ємнісними електродами в конкретному середовищі і геометрії [120]. Ємнісні сенсори задовольняють граничну умову Діріхле

$$\varphi(x, y, z) = \begin{cases} V & | (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ 0 & | (x, y, z) \in \Gamma_2, \\ 0 & | (x, y, z) \in \Gamma_3 \end{cases}$$

де Γ_1 – поверхня випромінюючого електроду;

Γ_2 – поверхня приймаючого електроду;

Γ_3 – зовнішня поверхня обчислювальних областей;

V – напруга, прикладена до випромінюючого електроду.

Після вирішення рівняння (3.4), можна застосувати закон Гаусса в числовому вигляді інтеграла по поверхні приймаючого електрода для обчислення індукованого заряду на цьому електроді шляхом розрахункового розподілу електричного потенціалу. Закон Гаусса можна записати у вигляді

$$q = - \oint_S \varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z) ds,$$

де S – оточуюча поверхня приймаючого електрода;

ds – елемент поверхні.

Для моделювання застосовувався комерційний пакет COMSOL Multiphysics. COMSOL обробляє загальні, статичні та квазістатичні електромагнітні поля структури 2D і 3D, і забезпечує зручне підключення до MATLAB для подальшого і гнучкішого аналізу. Крім того, моделі, побудовані в COMSOL, добре підходять для застосування з іншими чисельними методами [121], такими як методи моменту [81], методи функцій Гріна [80] і методи перетворення Фур'є.

Методика побудови моделі в COMSOL полягала в наступному:

1. Обрати режим моделювання.
2. Створити геометричну структуру моделі (включаючи сенсор і зразок) і визначити розрахункову область.
3. Згенерувати сітку з відповідним розміром і формою.
4. Вказати властивості суб-доменів (визначити електричні властивості).
5. Вказати граничні умови.
6. Розв'язати модель і знайти розподіл електричного поля.
7. Розрахувати бажанні фізичні величини в режимі пост-обробки або експортувати дані в MATLAB для подальшого розрахунку.

3.2 Аналіз впливу параметрів системи «об'єкт контролю-сенсор» на результат контролю

При моделюванні використовувалися електроди у формі прямокутників з нульовою товщиною. Передбачалося, що довжина прямокутного електрода набагато більша, ніж ширина, таким чином розподіл електричного поля уздовж довжини можна вважати постійним. Виходячи з цього, 3D-геометрія задачі може бути зведена до 2D моделі, яка може бути використана для відображення задачі. В зв'язку з цим моделювання проводилося у двовимірній планарній постановці.

Для уніфікації розрахунків було введено відносну величину « H », всі геометричні розміри задавалися відносно цієї величини. Геометрія моделі наведена на рис. 3.1.

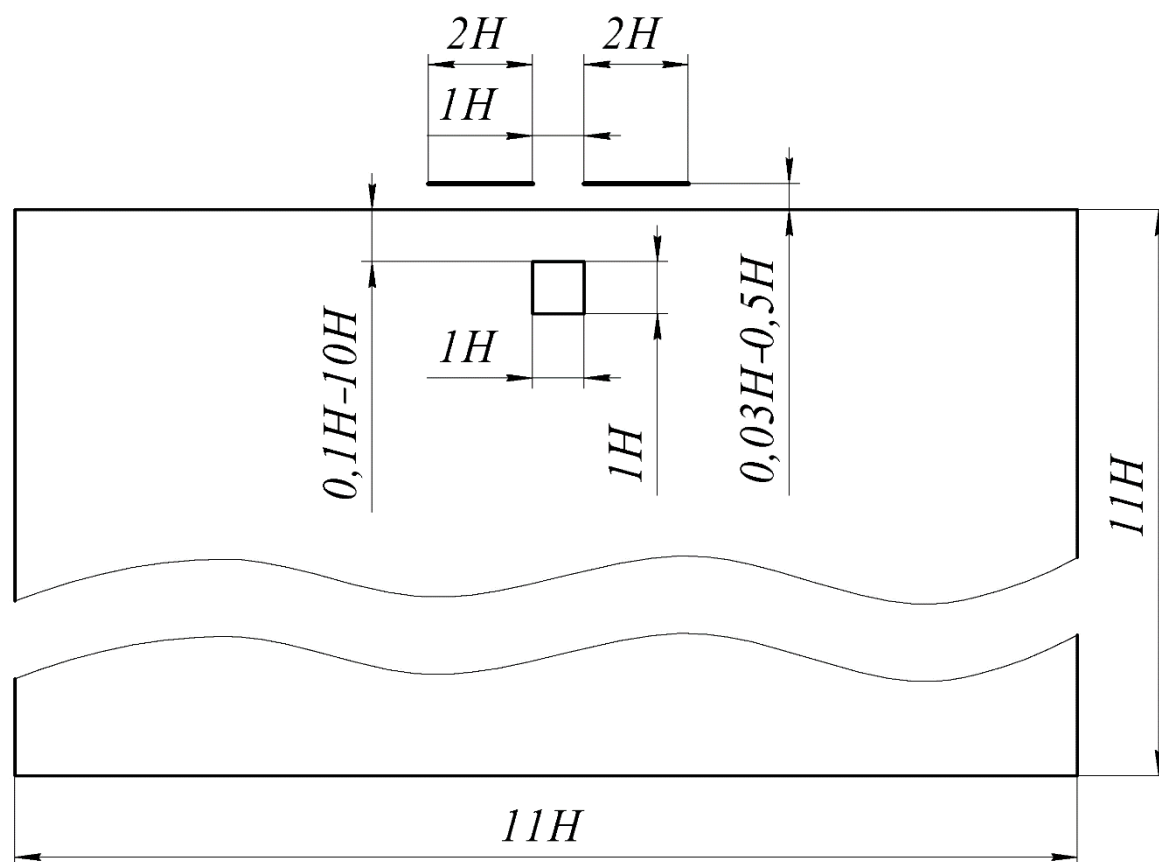


Рисунок 3.1 – Геометрія моделі матеріалу з дефектом

З метою визначення мінімально необхідної густоти розрахункової сітки для отримання якісного результату розрахунку проводилося дослідження збіжності сітки. Характерний розмір елементу поступового зменшувався та порівнювався контрольний параметр при різних значеннях граничних розмірів елемента. В якості контрольного параметра використовувалося значення електричної ємності між електродами.

В ході дослідження проводився ряд моделювань з різними геометричними параметрами системи. Для прикладу, на рис. 3.2 зображено розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі при різній глибині залягання дефекту.

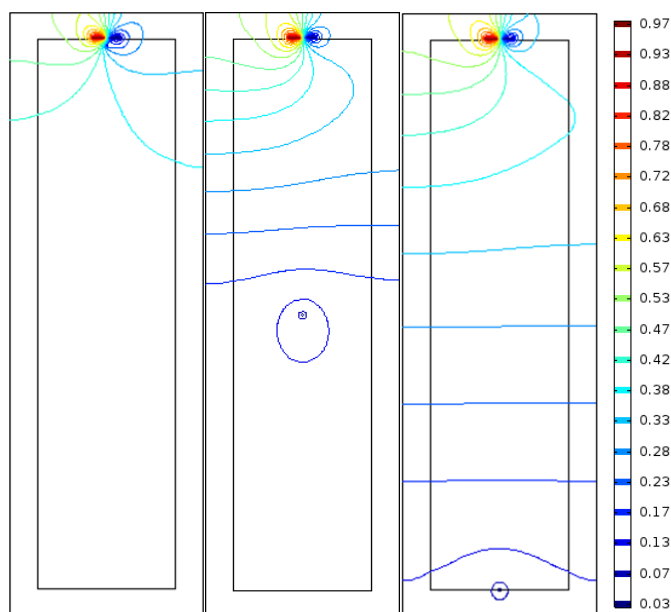


Рисунок 3.2 – Розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі при різній глибині залягання дефекту

З рис. 3.2 видно, що розподіл електричного потенціалу має значні відмінності при різній глибині залягання дефекту.

3.2.1 Вплив товщини об'єкта на процес контролю

Товщина зразка має прямий вплив на процес контролю. Для непровідного зразка, якщо товщина зразка надто мала, електричне поле буде проникати крізь зразок. Якщо товщина зразка збільшується, в кінцевому рахунку, все електричне поле буде в межах зразка, і сенсор буде нечутливим до товщини, що може відображати глибину проникнення ємнісного сенсора.

Крім того, для непровідних зразків заземлена підкладка значно впливатиме на результати. Відносне значення діелектричної проникності зразка, яке використовували для дослідження впливу товщини і заземленої підкладки становило 4, а робочий зазор було встановлено на рівні $0.3H$ для всіх типів товщини. Досліджувався вплив товщини (від $1H$ до $15H$) для зразків з заземленою підкладкою та без нею. Результати моделювання представлено на рис. 3.3, де відносна ємність розраховується за формулою

$$C^* = \frac{C_x}{C_0},$$

де C_x – ємність в конкретному досліді; C_0 – максимальная ємність при моделюванні.

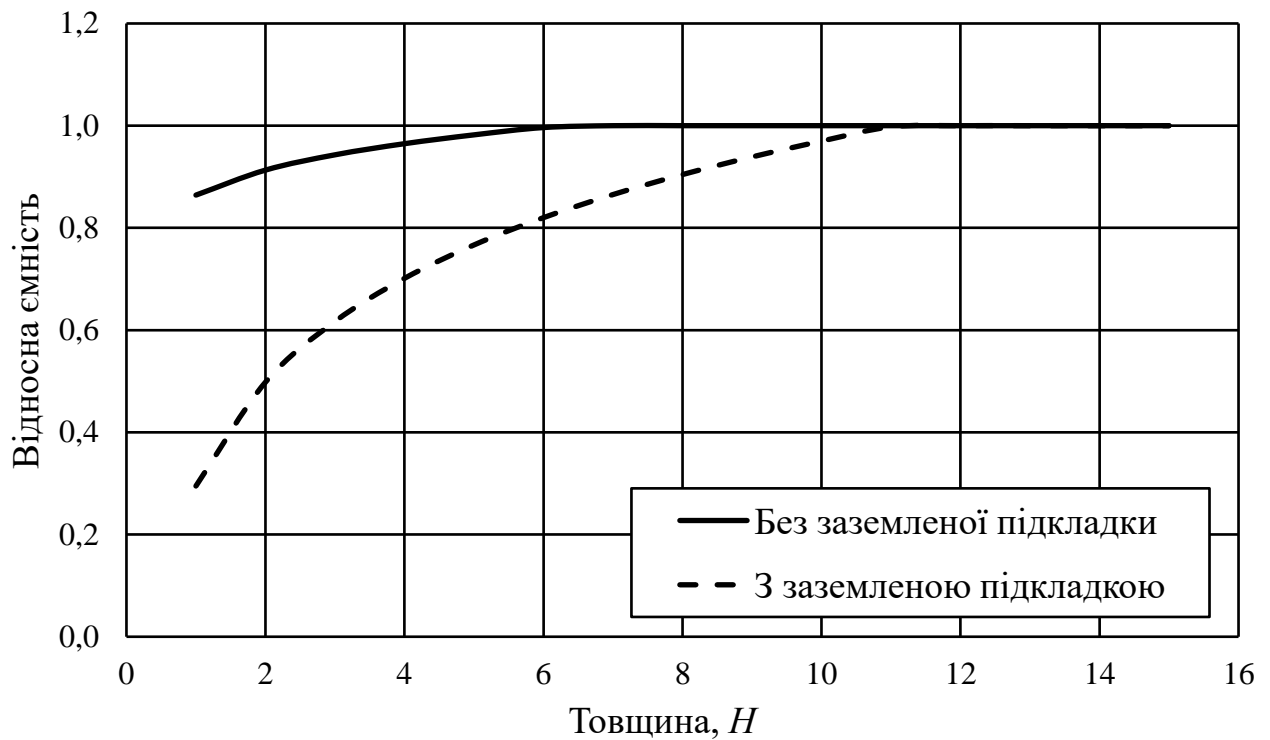


Рисунок 3.3 – Залежність відносної ємності від товщини зразка

Враховуючи мінімальну різницю у ємності 3%, при проведенні контролю з заземленою підкладкою максимально можлива товщина ОК, за якої можливе виявлення дефекту, становить $11H$. При контролі без заземленої підкладки максимальна товщина ОК є значно меншою та становить $5H$.

Крім того, отримані залежності демонструють, що метод дозволяє визначати товщину ОК, співвідносячи отримані електричні ємності при проведенні одночасного дослідження ОК з заземленою підкладкою та без неї.

Для провідних зразків, як показало моделювання, сенсор нечутливий до товщини.

3.2.2 Вплив робочого зазору на процес контролю

Не завжди можливо досягти мінімального робочого зазору, тому необхідно дослідити вплив робочого зазору. При збільшенні робочого зазору зразок може бути за межами діапазону поля. Щоб дослідити вплив робочого зазору товщина зразка становила $20H$, товщина значно більша, ніж критична товщина для обох випадків відповідно до результатів, отриманих при дослідженні товщини зразка. Таким чином, товщина (без заземленої підкладки та з нею) не матиме ніякого впливу на реакцію сенсора в моделях. У цьому випадку було досліджено непровідний зразок із значенням діелектричної проникності 4 і провідний зразок із заземленою поверхнею. Результати дослідження наведені на рис. 3.4.

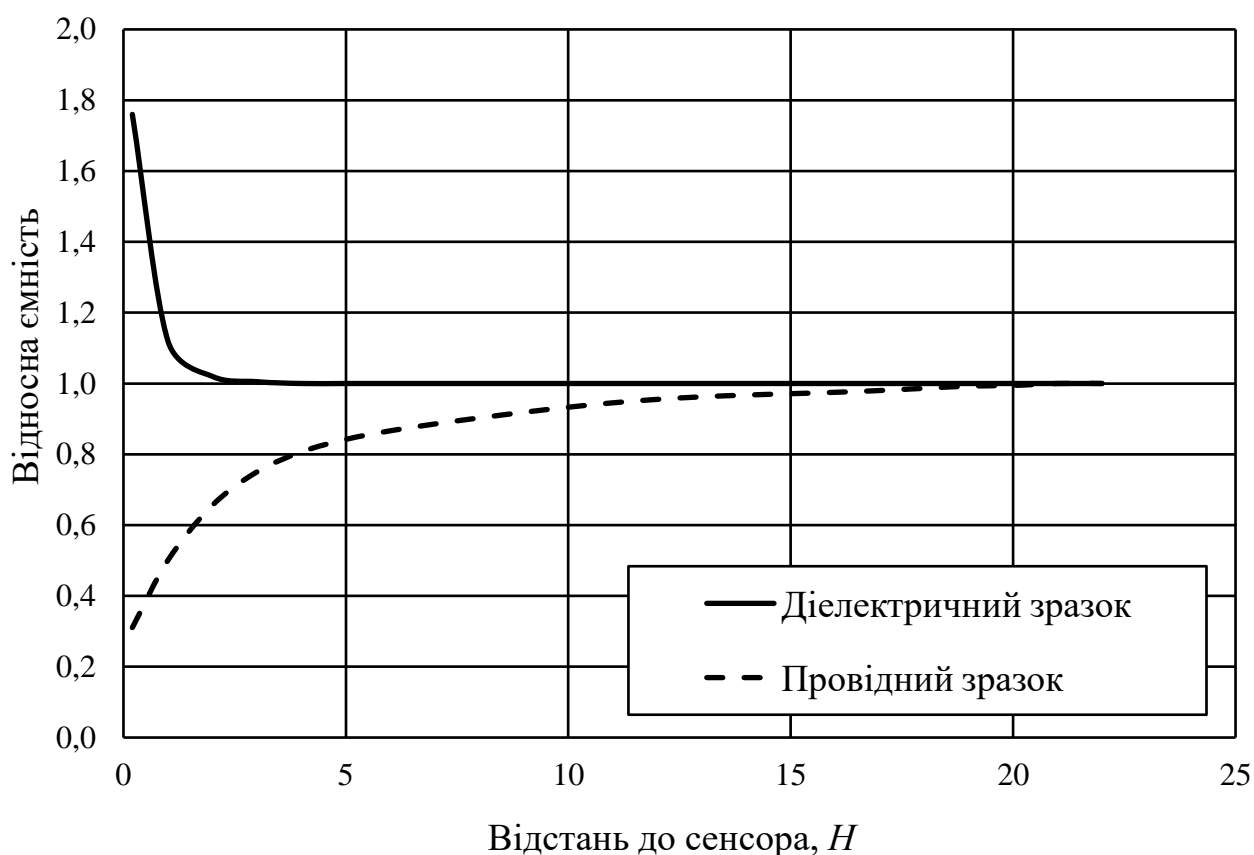


Рисунок 3.4 – Залежність відносної ємності від робочого зазору

Як видно з рис. 3.4 відносна ємність сенсора при дослідженні діелектричного та провідного зразка прямує до свого усталеного значення з різним знаком.

Враховуючи мінімальну різницю у ємності 3%, при проведенні контролю діелектричного зразка, максимальний робочий зазор, за якого можливе виявлення дефекту, становить $3H$. При контролі провідного зразка максимальний робочий зазор становить $18H$.

Визначення максимально можливого робочого зазору дозволяє зробити рекомендації щодо отримання достовірних результатів при здійсненні контролю електроємнісним методом.

Окрім того, за малого робочого зазору можливе здійснення контролю нерівності поверхні ОК, що є додатковою можливістю застосування методу.

3.2.3 Вплив значень діелектричної проникності

Якщо зразок знаходиться в безпосередньому контакті з електродами, ємність буде пропорційна величині діелектричної проникності [122]. Тим не менш, це зустрічається рідко, адже завжди буде повітряний зазор між зразком і електродами. Моделі були побудовані таким чином, щоб з'ясувати зв'язок між ємністю сенсора і відносною діелектричною проникністю зразка з повітряним зазором.

Непровідний зразок, розглянутий у даному випадку, має товщину $20H$ та робочий зазор $0.3H$. Величина діелектричної проникності змінювалася від 1 до 80. Додатково досліджувався вплив заземленої підкладки на значення відносної ємності.

На рис. 3.5 зображено залежність відносної ємності від відносної діелектричної проникності діелектрика для зразка без заземлення підкладки та з її застосуванням.

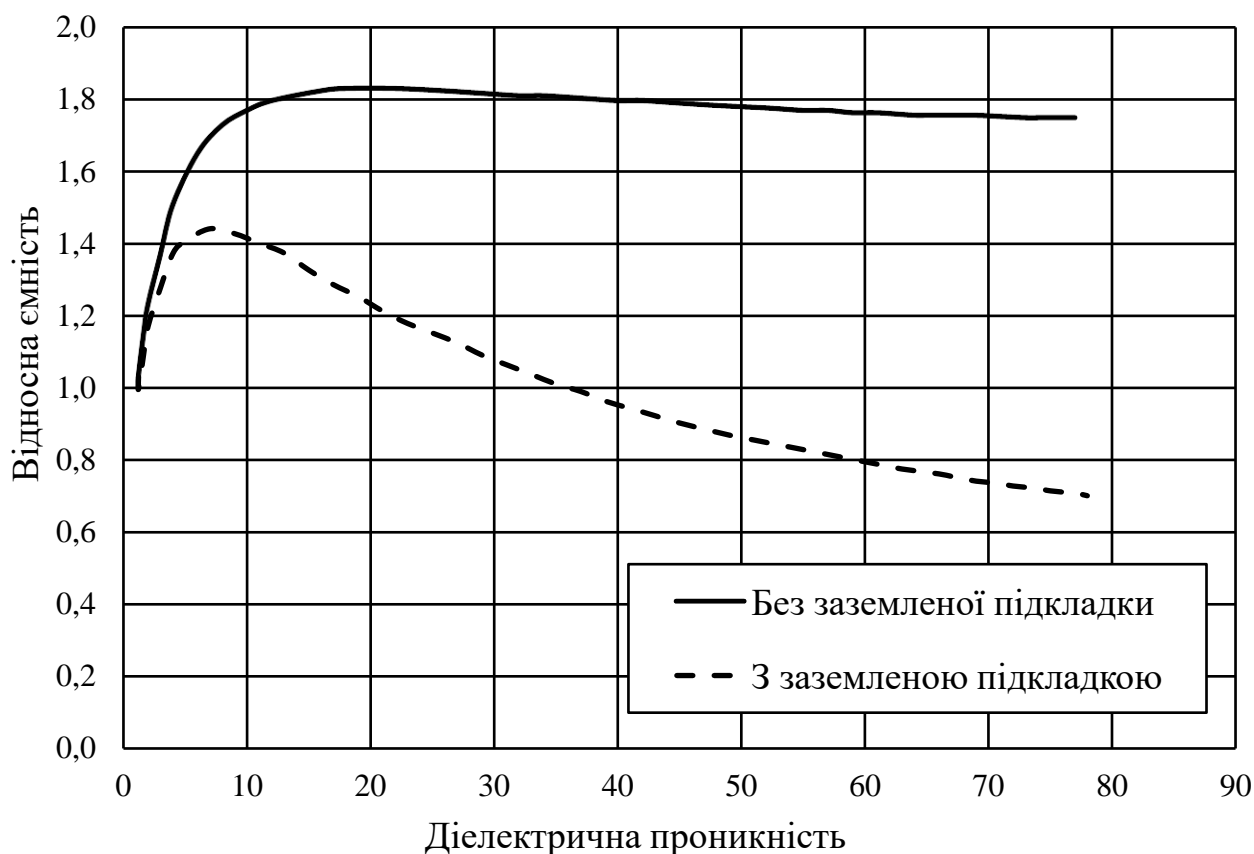


Рисунок 3.5 – Залежність відносної ємності від діелектричної проникності діелектрика для зразка без заземлення підкладки та з нею

Як видно з рис. 3.5 наявність та відсутність заземленої підкладки для зразка значним чином впливає на значення відносної ємності та потребує подальшого аналізу.

Враховуючи мінімальну різницю у ємності 3%, при проведенні контролю непровідних зразків можна виділити 3 випадки:

- $\varepsilon < 5$, відсутність заземленої підкладки дозволяє отримати більш високу чутливість, ніж її наявність;
- $5 \leq \varepsilon \leq 6$, контроль можливий лише без заземленої підкладки, так як при наявності підкладки спостерігається зона нечутливості;
- $\varepsilon > 6$, наявність заземленої підкладки дозволяє отримати більш високу чутливість, ніж її відсутність.

3.3 Моделювання процесу виявлення різних типів дефектів

З метою визначення параметрів системи при контролі дефектів у зразках було здійснено моделювання наявності дефектів різних типів.

Розрахункова область моделі $180H$ на $120H$, ширина зразка – $100H$, товщина – $20H$. Було встановлено робочий зазор у розмірі $0.5H$. Було змодельовано три основні типи дефектів, а саме, виступ, жолобок шириною $7H$ і жолобок шириною $3H$. Зазначені дефекти досліджувалися для діелектричного та провідного зразку. Для діелектричних зразків однорідність та ізотропність вважалися ідеальними. Провідний зразок був заземлений. Передбачалося, що всі порожнечі будуть заповнені повітрям ($\epsilon_0=1$).

Для імітації сигналу, зразок був встановлений в центрі розрахункової області і сенсор був переміщений по ширині області зліва направо, нульове положення було взяте в якості виступу в першому випадку і в якості центру жолобків в двох останніх випадках.

3.3.1 Дефект типу виступ

Першим модельованим дефектом був виступ. Структуру сенсора і зразка схематично показано на рис. 3.6.

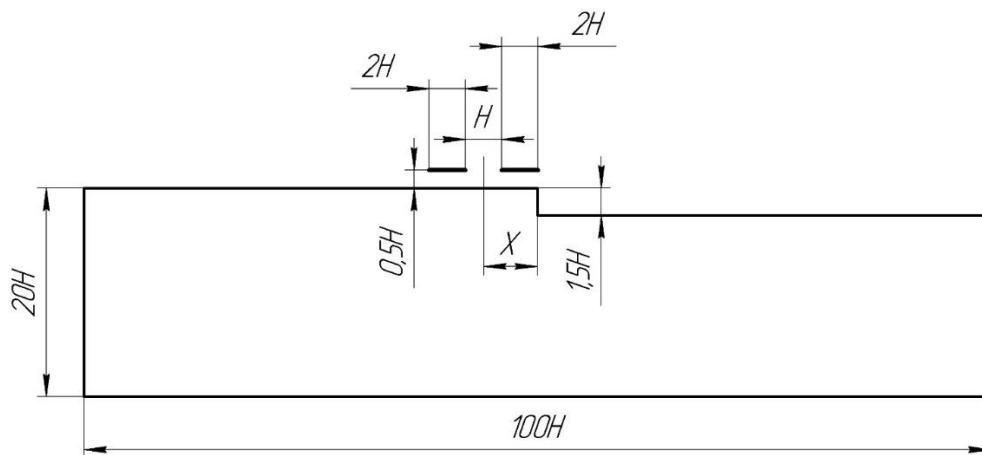


Рисунок 3.6 – Взаємне розташування сенсора і зразка з виступом

На рис. 3.7 зображено розподіли електричного потенціалу для провідного і непровідного зразків.

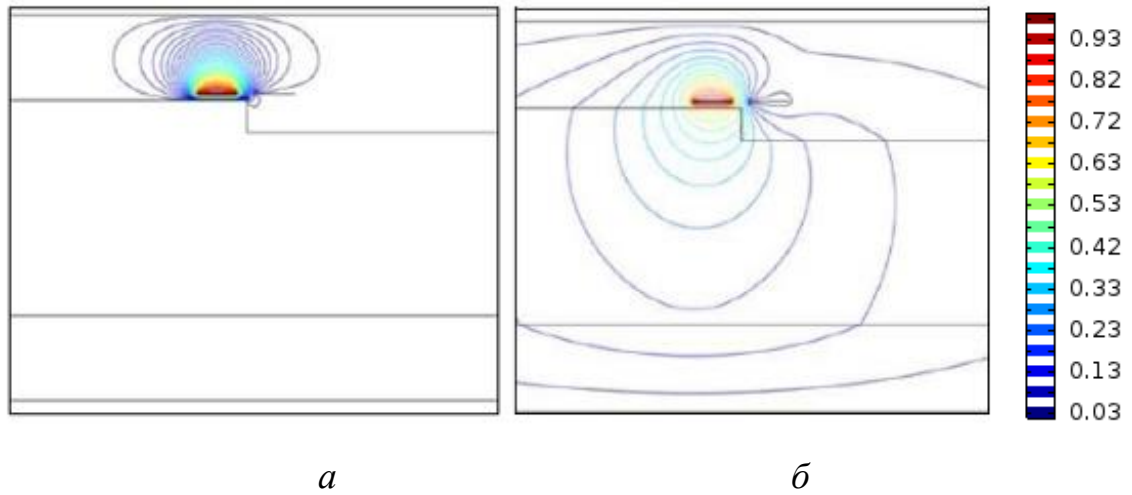


Рисунок 3.7 – Розподіл електричного потенціалу: (а) – провідний зразок;
б – діелектричний зразок

Значення відносної ємності при різних положеннях сенсора відносно дефекту у зразку зображено на рис. 3.8.

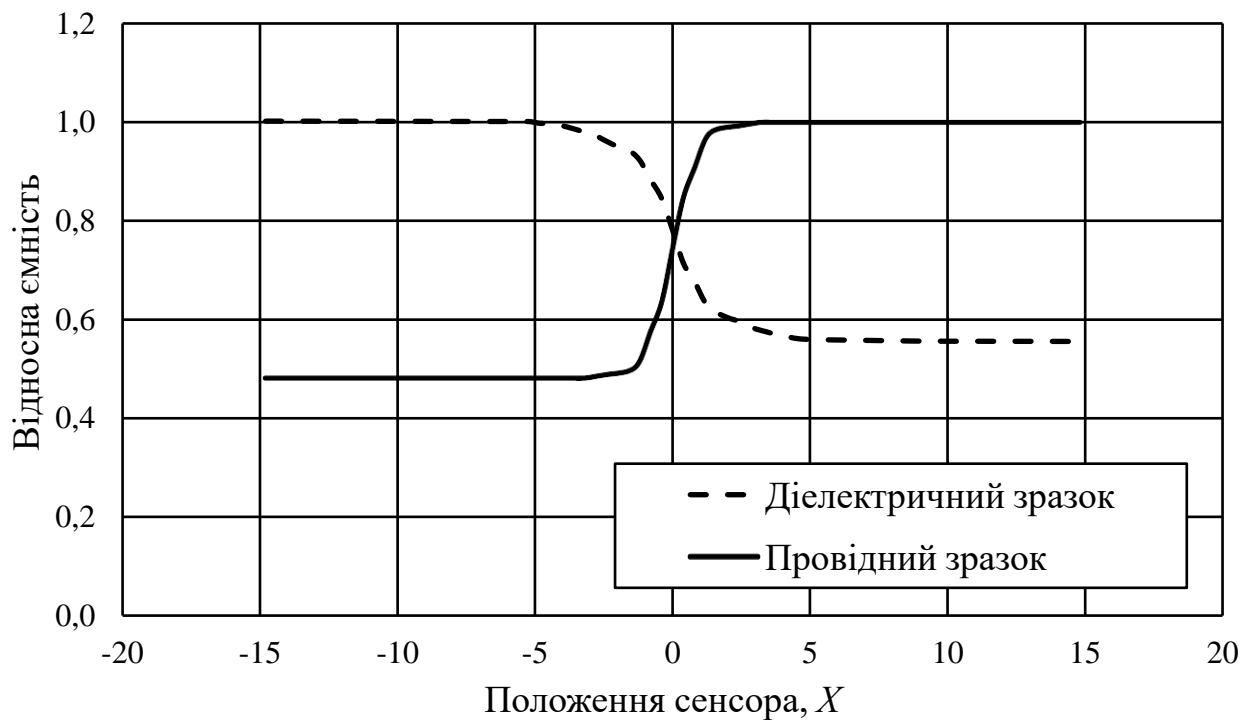


Рисунок 3.8 – Залежність відносної ємності від положення сенсора

На рис. 3.8 видно зміну відносної ємності в обох випадках, але ці зміни були протилежних напрямків. В провідному зразку видно більше виражені гострі кути.

Таким чином, дослідження параметрів системи при контролі дефекту типу виступ підтвердило можливість застосування методу як для діелектричних, так і для провідних зразків.

3.3.2 Дефект типу широкий жолоб

Другим модельованим дефектом був прямокутний жолоб шириною $7H$, який був ширшим, ніж загальна ширина сенсора ($5H$). Сенсор і зразок схематично показані на рис. 3.9.

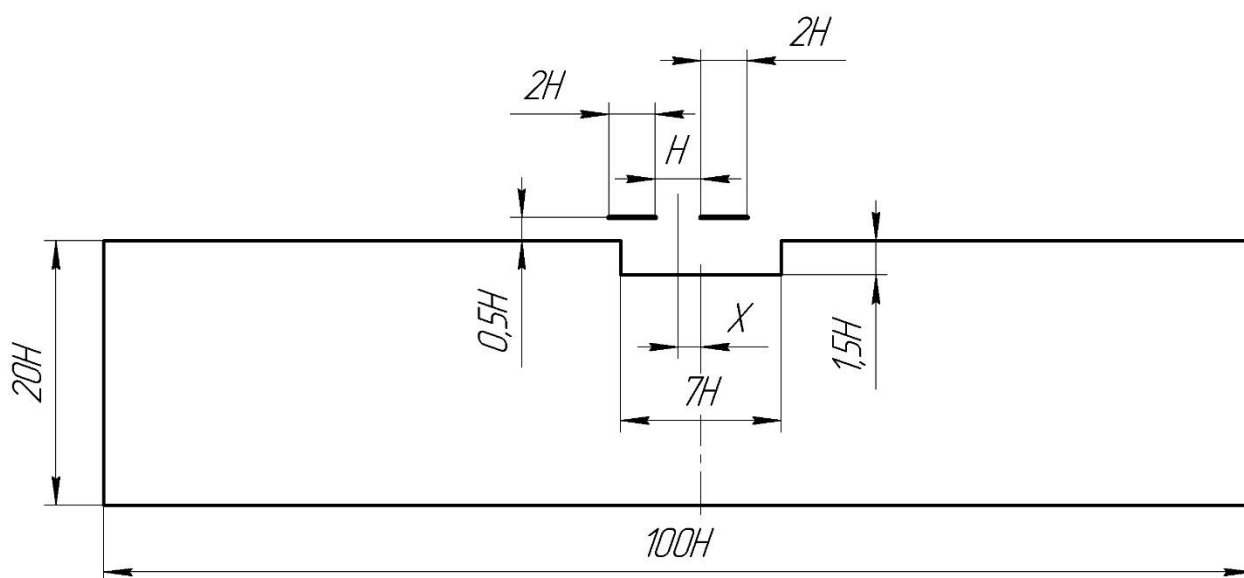


Рисунок 3.9 – Геометрія зразка з виїмкою $7H$

На рис. 3.10 зображено розподіли електричного потенціалу для провідного і непровідного зразків.

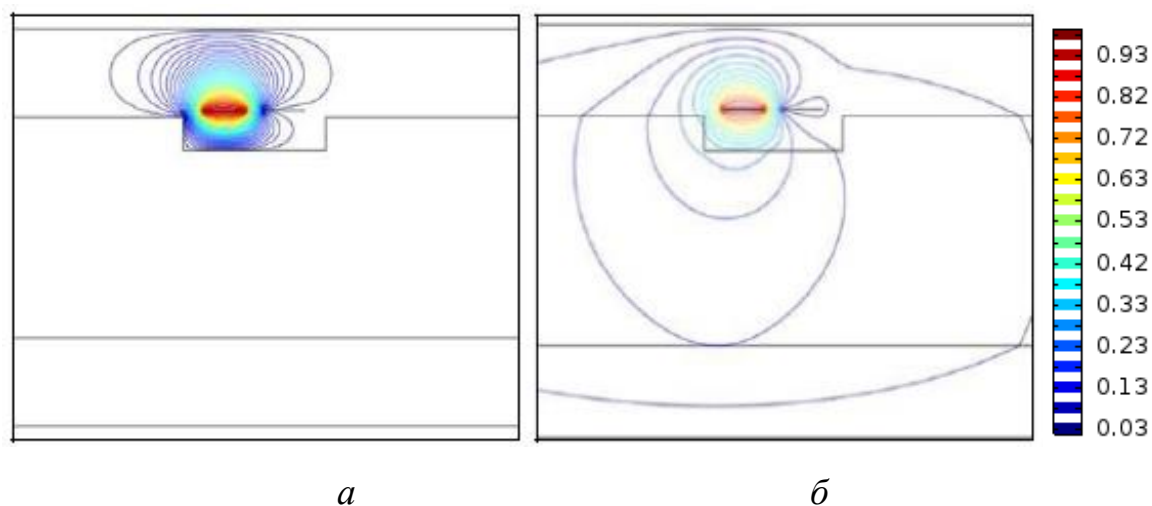


Рисунок 3.10 – Розподіл електричного потенціалу: (а) – провідний зразок;
б – діелектричний зразок

Значення відносної ємності при різних положеннях сенсора відносно дефекту у зразку зображено на рис. 3.11.

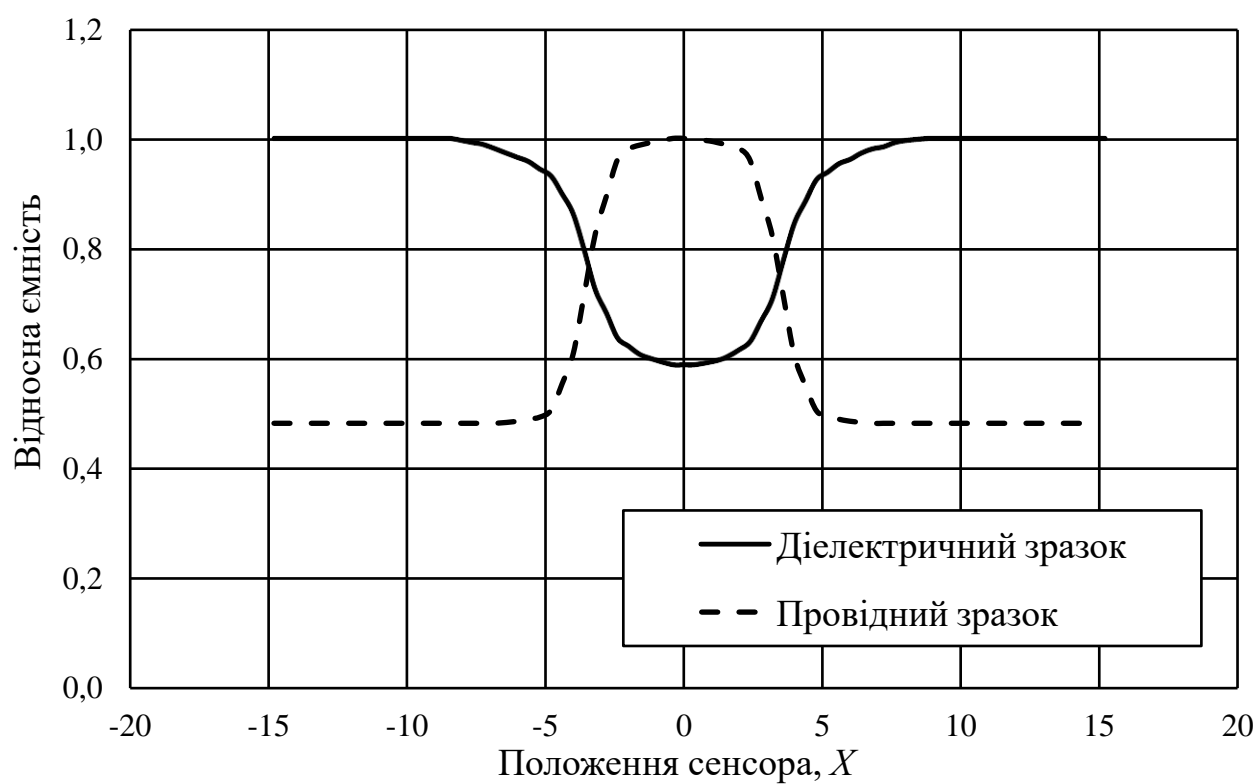


Рисунок 3.11 – Залежність відносної ємності від положення сенсора

Обидва результати, зображені на рис. 3.11, симетричні до нульової позиції, що і слід було очікувати від структури дефекту. Чіткою різницею між результатами є те, що дві криві мають протилежні полярності. Динамічні діапазони результатів майже однакові для кожного випадку, що пов'язано з тим, що жолобок ширший ніж сенсор і, коли сенсор розміщений по центру над жолобком, електричне поле не буде сильно залежати від країв жолобка, тому розрахована ємність буде визначатися тільки глибиною жолобка і буде приблизно такою, як і у випадку з дефектом у формі виступу.

3.3.3 Дефект типу вузький жолоб

Третім модельованим дефектом був дефект типу жолобка завширшки $3H$, який був вузьчим, ніж загальна ширина сенсора $5H$ (рис. 3.12).

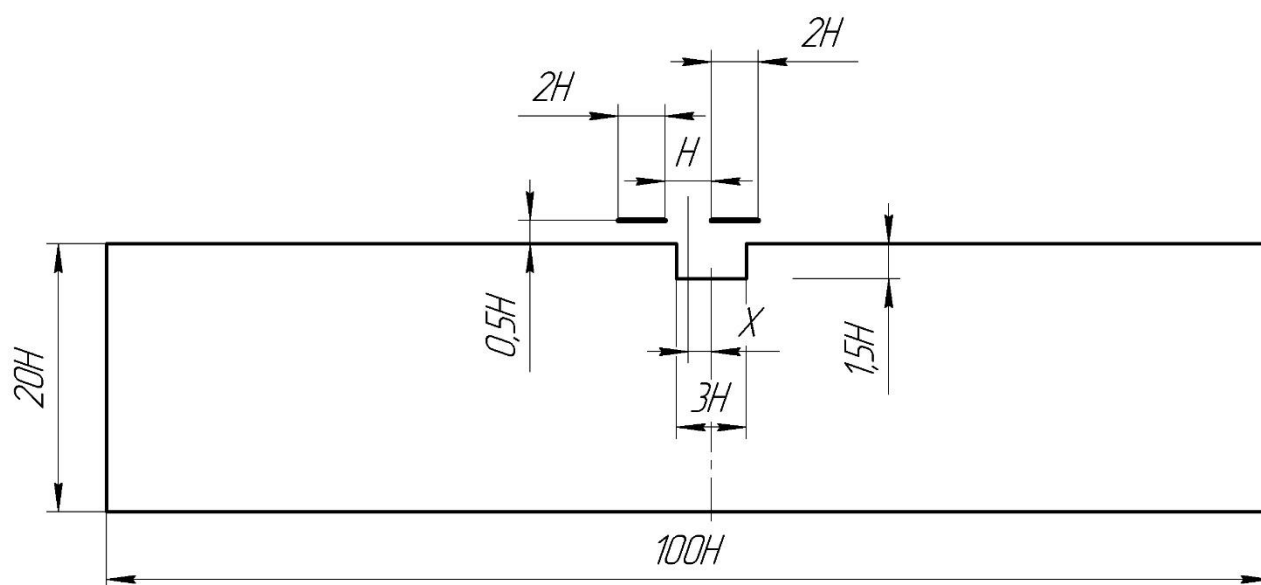


Рисунок 3.12 – Геометрія зразка з виїмкою $3H$

На рис. 3.13 зображено розподіли електричного потенціалу для провідного і непровідного зразків.

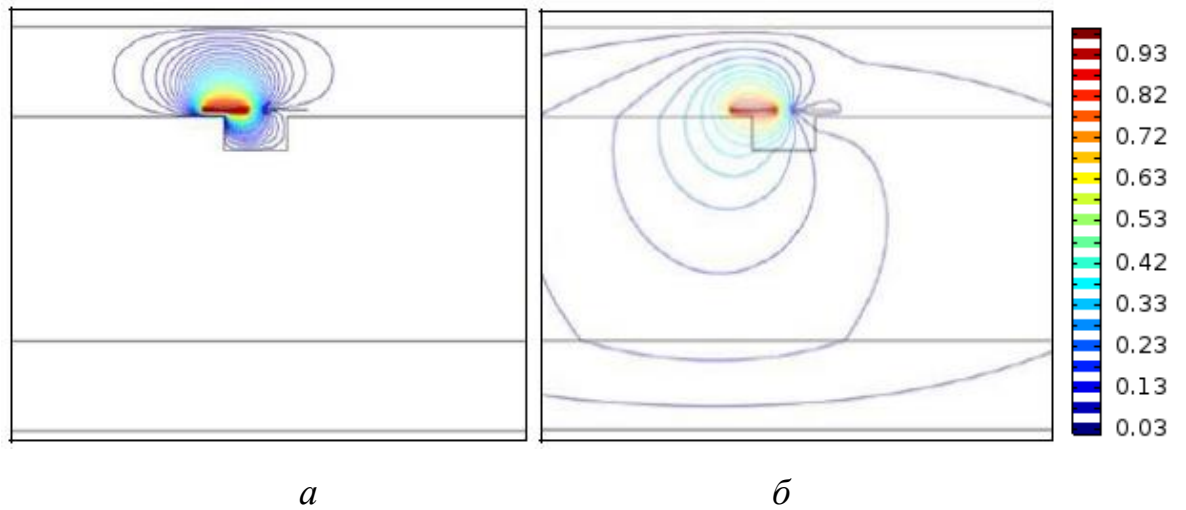


Рисунок 3.13 – Розподіл електричного потенціалу: (а) – провідний зразок;
б – діелектричний зразок

Значення відносної ємності при різних положеннях сенсора відносно дефекту у зразку зображено на рис. 3.14.

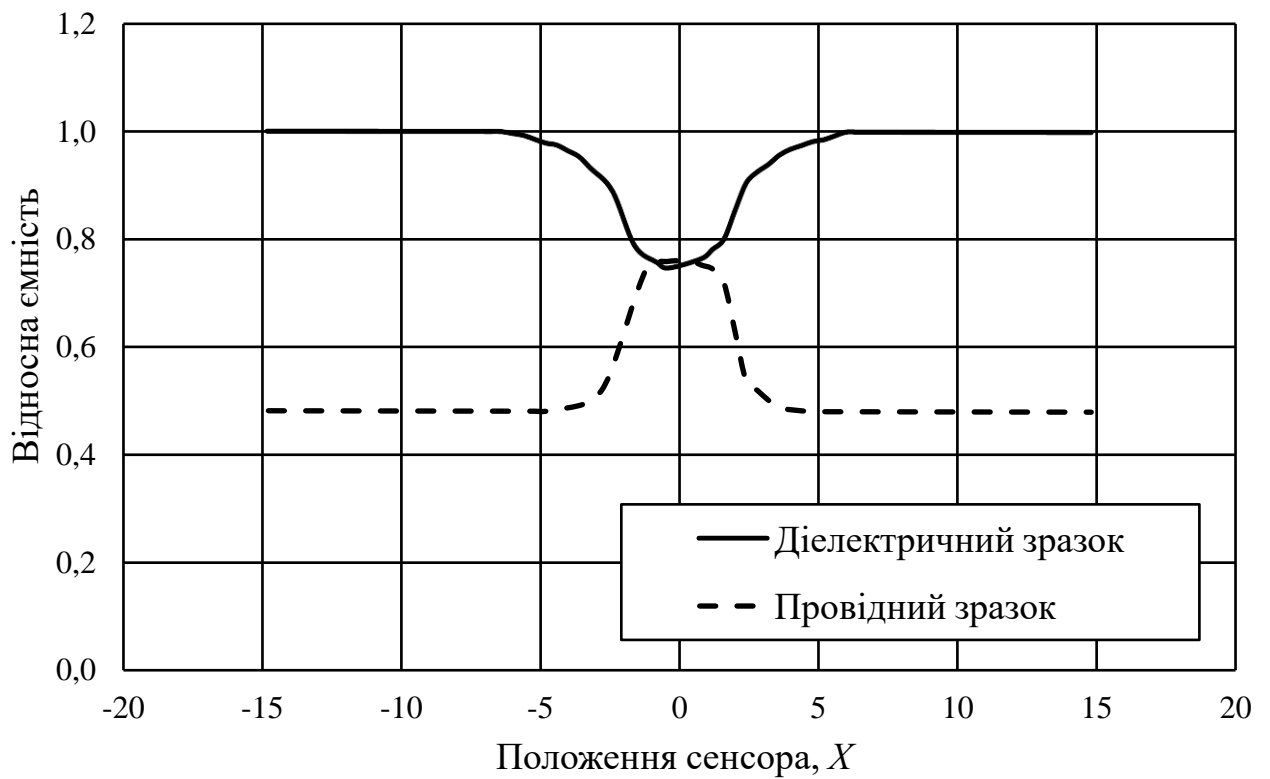


Рисунок 3.14 – Залежність відносної ємності від положення сенсора

Експеримент із жолобком шириною $3H$ показав аналогічні результати, як і експеримент із жолобком шириною $7H$ як для провідного, так і для діелектричного зразків. Однак, з модельованих електричних полів, показаних на рис. 3.13, можна побачити, що, коли сенсор розміщений по центру над жолобком, ребра вузького жолобка розташовуються так, що електричні лінії розташовуються щільніше в порівнянні з випадком жолобка шириною $7H$, крім того, вони відіграють значнішу роль у вимірюванні, що становить додаткову складність для отримання інформації про глибину жолобка. Більше того, очевидно, що динамічні діапазони кривих, показаних на рис. 3.14 менші, ніж відповідний результат у ситуації з жолобком шириною $7H$.

3.4 Обґрунтування конфігурації електродів ємнісного сенсора

2D моделі показують як сенсори взаємодіють з різними зразками в різних ситуаціях. Для характеристики сенсорів складнішої структури, ніж просто пара прямокутних електродів (наприклад, сенсори із захисним електродом і трикутними електродами), необхідні 3D моделі [123].

3D-моделі були створені в COMSOL Multiphysics. 3D-моделі для сенсорів поєднують електростатичний режим і режим провідних матеріалів. З такої комбінації можливо застосувати моделі і функції, необхідні для розрахунку ємності.

Модель для трикутного сенсора складається з розрахункової області $60 \times 60 \times 60$ мм з центром в точці ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$); прямокутнику розмірами 50 мм на 30 мм, що розміщено на площині $z = 0$ і витіснено вгору на товщину 2 мм і виступів в якості діелектричної підкладки сенсора [124], як показано на рис. 3.15.

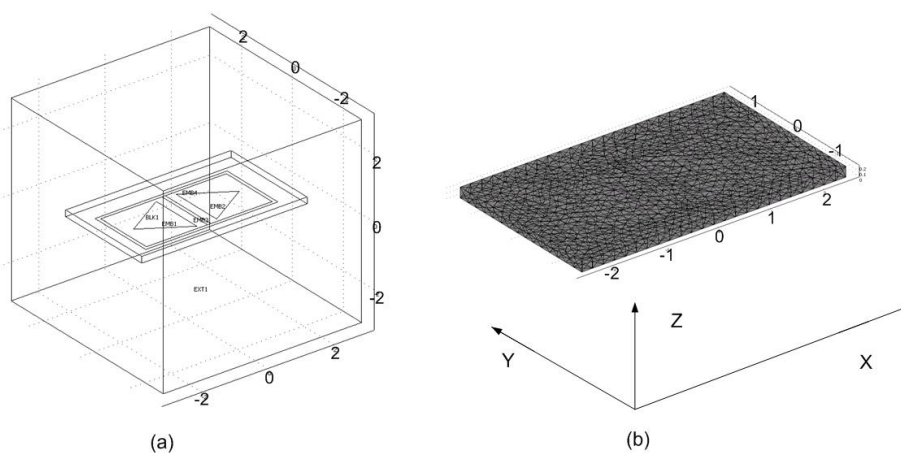


Рисунок 3.15 – Розрахункова область 3D моделі

На рис. 3.16 зображено вигляд моделі у трьох площинах координат.

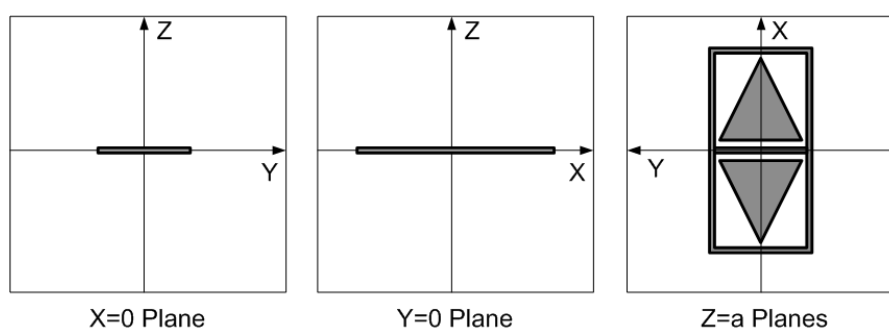


Рисунок 3.16 – Модель у площинах координат

Дослідження параметрів ємнісних сенсорів здійснювалося для сенсорів різної геометричної конфігурації [125] (рис. 3.17).

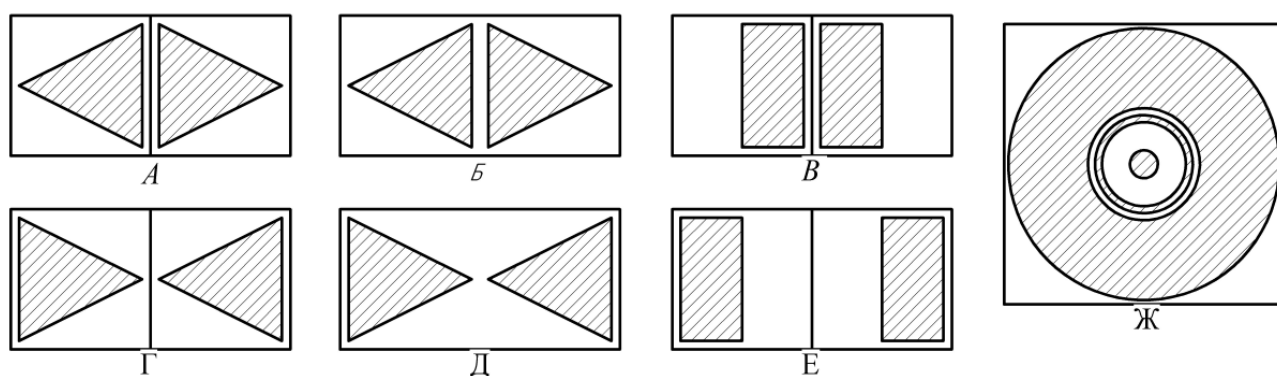


Рисунок 3.17 – Конфігурації досліджуваних ємнісних сенсорів різних типів (А, Б, В, Г, Д, Е, Ж)

Існує два способи відображення електричного поля [126]. Перший спосіб – з використанням ліній електричного поля, в якому безпосередньо показаний напрям електричного поля, а сила пов'язана із ступенем щільності ліній. Другий спосіб використовує електричний потенціал, в якому напрям електричного поля є перпендикулярним до поверхні, і сила залежить від ступеня щільності рівних потенційних поверхонь. Хоча обидва із способів можна використати в COMSOL, у дослідженні надається перевага другому способу, адже він може забезпечити чіткішу ілюстрацію при моделюванні.

3.4.1 Метод збудження

Метод збудження, як термін, означає метод оцінювання наслідків введеного збудження на отриманій ємності [127, 128]. Розподіл чутливості в площині, паралельній поверхні сенсора отриманий шляхом розміщення куба розміром 5x5x5 мм, що представляє собою дефект, під сенсором на відстані 2 мм. Рис. 3.18 (а) показує модель для оцінки розподілу чутливості з 64 збудженнями, розподіленими по сенсору. Для того, щоб уникнути необхідності повторно конструювати структуру обурень у будь-якому положенні, всі 64 збудження розмістили в основній області і діелектричне значення тільки одного збудження було змінено. Загальна діелектрична проникність була встановлена 1 (повітря), а значення діелектричної проникності ОК – 3,3 (плексиглас).

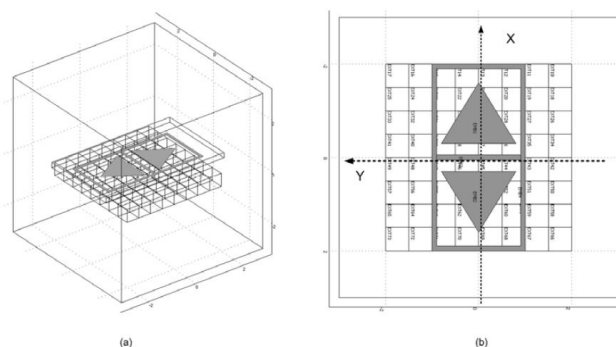


Рисунок 3.18 – Модель для оцінки розподілу чутливості з 64 збурень.

(а) 3D-вид і (б) вид 2D з системою координат

Зміна ємності ΔC_n через наявність одного конкретного збудження в положенні n визначається за формулою

$$\Delta C_n = |C_n - C_0|,$$

де C_0 – ємність для бездефектної області.

Розподіл чутливості S пропорційний величині

$$S^*(x) = \frac{\Delta C_n(x)}{\max[\Delta C_n(x)]},$$

де $n=1\dots 64$, а $\max(\Delta C_n)$ – максимальне ΔC_n серед всіх збудрень.

Таким чином, 64 збудження надають 64 значень чутливості у відповідних положеннях.

Рис. 3.19 показує розрахункові значення чутливості, які записані за напрямком сенсора, показаного на рис. 3.18 (b). На рис. 3.19 можна побачити, що високі значення чутливості в середині сенсора.

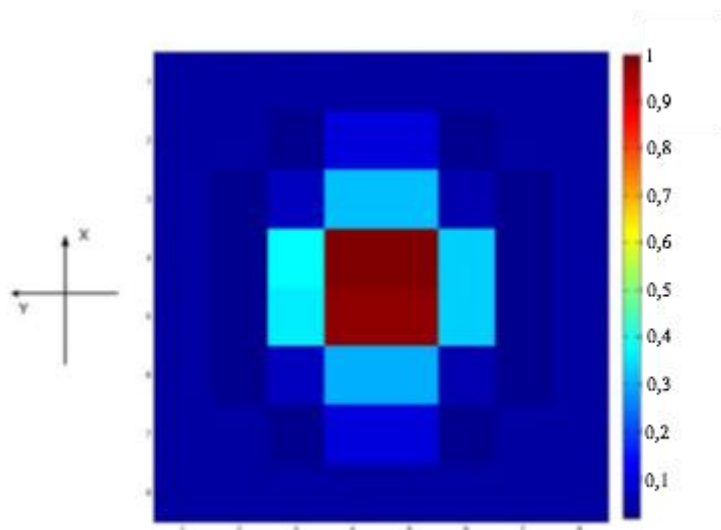


Рисунок 3.19 – Розподіл чутливості в площині $z = -0.2$

З точки зору обчислень складно отримати такий розподіл чутливості, використовуючи метод збудження, адже модель необхідно обчислити 64 рази, щоб отримати всі 64 рівні чутливості на площині.

3.4.2 Математична модель розподілу чутливості

Для того, щоб уникнути повторних обчислень необхідні ефективніші моделі. Щоб отримати розподіл чутливості ємнісного сенсора, в модель вводиться невелике збудження з високою діелектричною проникністю ϵ_r . Обсяг збудження є невеликим по відношенню до обсягу впливу, тому електричне поле можна розглядати як лінійне/однорідне в області збудження.

Збудження в електричному полі, створюваному випромінюючим електродом, можна змоделювати як диполь з ефективним моментом γP , де γ – обсяг збудження і P – поляризація цього збудження, викликана електричним полем E_D від прикладеної напруги V випромінюючого електрода. Дипольну поляризацією P електричного поля, спричиненого випромінюючим електродом E_D можна записати у вигляді

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}_D, \quad (3.5)$$

де χ_e – електрична сприйнятливість дипольного середовища, яка пов'язана з його відносною діелектричною проникністю ϵ_r залежністю

$$\chi_e = \epsilon_r - 1.$$

Наявність диполя змінить електричне поле і викличе зміну сигналу на приймаючому електроді. Ємність між випромінюючим і приймаючим електродами може бути визначена як

$$C = \frac{Q_s}{V},$$

де Q_s – заряд на приймаючому електроді;

V – напруга, що прикладається до випромінюючого електрода.

Різниця потенціалів між електродами дорівнює $V + \Delta V$, а зміна ємності ΔC , викликана збудженням можна обчислити

$$\Delta C = \frac{Q_s}{V + \Delta V} - \frac{Q_s}{V} \approx -\frac{Q_s}{V^2} \Delta V \quad (3.6)$$

де ΔV є малою відносно V .

Складно вирахувати ΔV безпосередньо з моделювання електричного поля, викликаного введенням диполя в довільній позиції, і оцінити вплив диполя у будь-якому положенні в обсязі, як і у методі збурень, тут необхідна ітераційна процедура, яка займає багато часу для обчислення. Замість того, щоб моделювати електричне поле безпосередньо, можна використати теорему взаємності, спочатку введену Германом фон Гельмгольцем, щоб передбачити зміну потенціалу на електроді ΔV через збудження. У випадку ємнісного сенсора, через взаємопов'язаність заряду і електричного потенціалу, прогнозування потенційної зміни ΔV приймаючого електрода, викликаной диполем збудження можна отримати через розгляд потенціалу електричного поля Φ_u на позиції збудження, спричиненого одиничним зарядом приймаючого електрода. Тоді внесок диполя до зміни напруги ΔV можна виразити як

$$\Delta V = \gamma \vec{P} \cdot \vec{E}_u, \quad (3.7)$$

де E_u – електричне поле на позиції збудження, викликаного одиничним зарядом приймаючого електрода.

Враховуючи електричну зміну потенційної енергії на одиницю заряду на електроді, викликаной чутливим дипольним збудженням, що позначається як U , отримуємо

$$U = q \Delta V, \quad (3.8)$$

оскільки в цьому випадку q – одиничний заряд, то отримуємо

$$U = \Delta V. \quad (3.9)$$

Електрична зміна потенційної енергії на одиницю заряду U повинна бути рівною електричному потенціалу енергії взаємодії між блоком заряду і дипольним збуренням, які можуть бути обчислені з диполя, розташованого в електричному полі E_u , створеного одиницею заряду. Ґрунтуючись на припущенні, що обсяг диполя невеликий, E_u можна розглядати як однорідне електричне поле в області диполя. Таким чином, U можна обчислити як

$$U = \vec{P}_{dipole} \cdot \nabla \Phi_u = -\vec{P}_{dipole} \cdot \vec{E}_u = -\gamma \vec{P} \cdot \vec{E}_u. \quad (3.10)$$

Рівняння (3.7) можна отримати з рівнянь (3.8), (3.9) і (3.10). Підставляючи рівняння (3.7) у рівняння (3.6), зміну ємності ΔC можна записати у вигляді

$$\Delta C = -\frac{Q_s}{V^2} \gamma \vec{P} \cdot \vec{E}_u, \quad (3.11)$$

де $Q_s \vec{E}_u$ – незбурене електричне поле, створене приймаючим електродом, якщо він приводиться в дію такою ж напругою V , в той час як потенціал випромінюючого електрода витримують при нулі (зворотна подача напруги) і може бути позначений як E_s . Підставляючи рівняння (3.5) в (3.11), зміну ємності через високу проникність дипольного збудження можна записати у такому вигляді

$$\Delta C = -\frac{\epsilon_0 \chi_e \gamma}{V^2} \vec{E}_D \cdot \vec{E}_s. \quad (3.12)$$

Для даного збудження і заданої напруги, прикладеної до випромінюючого електрода, величина $\frac{\epsilon_0 \chi_e \gamma}{V^2}$ постійна. Це зміна ємності, викликана диполем у

довільній позиції і визначає скалярний добуток необурених електричних полів випромінюючого (E_D) і приймаючого електрода (E_S) в цьому положенні. Для спрощення розрахунків, рівняння (3.12) можна переписати у вигляді

$$\Delta C = -\frac{\varepsilon_0 \chi_e \gamma}{V^2} \vec{E}_D \cdot \vec{E}_S = -\varepsilon_0 \chi_e \gamma \frac{\vec{E}_D}{V} \cdot \frac{\vec{E}_S}{V} = -\varepsilon_0 \chi_e \gamma \vec{\xi}_D \cdot \vec{\xi}_S,$$

де ξ_D і ξ_S – електричні поля в положенні дипольного збудження, коли відповідно одинична напруга спонукає до дії випромінюючий і приймаючий електроди.

Розподіл відносної чутливості може бути визначений

$$S^* = -\frac{\partial \Delta C}{\partial \varepsilon_0 \chi_e \gamma} = -\vec{\xi}_D \cdot \vec{\xi}_S. \quad (3.13)$$

Залежно від кутів двох електричних полів, можуть утворюватись ділянки, де значення чутливості дорівнюють нулю. Така ситуація зображена на рис. 3.20.

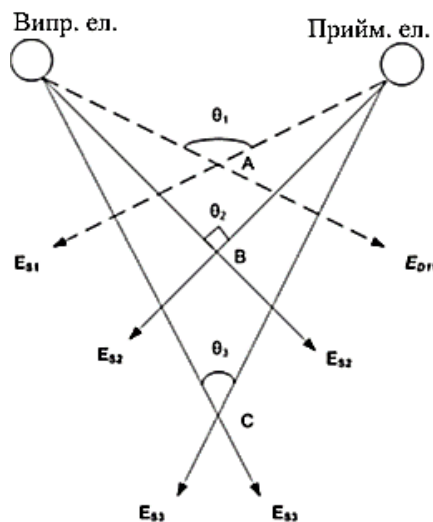


Рисунок 3.20 – Розподіл позитивних, нульових і негативних значень чутливості

Враховуючи випромінюючий електрод D і приймаючий електрод S в двох точкових зарядах, як показано в рівнянні (3.13), чутливість в точці A,

позначається як S_A , протилежна скалярному добутку двох електричних полів E_{SI} і E_{DI} . Через те, що кут θ_1 більший 90° , S_A є позитивною. Аналогічно, коли кут $\theta_2=90^\circ$, $S_B=0$, а коли $\theta_2 < 90^\circ$ – маємо $S_C < 0$. Через складність фактичної структури сенсора і позицій заземлених електродів розподіл чутливості є набагато складнішим процесом, ніж випадок, показаний на рис. 3.20.

Для прикладу наведено розподіли чутливості сенсорів A (рис. 3.21) та $Ж$ (рис. 3.22). Згідно рівняння (3.13), побудована модель повинна бути обчислена двічі, коли одиниця напруги (1V) спонукає до дії випромінюючий і приймаючий електроди. Отримані розподіли параметрів електричного поля у просторі експортуються в MATLAB для розрахунку.

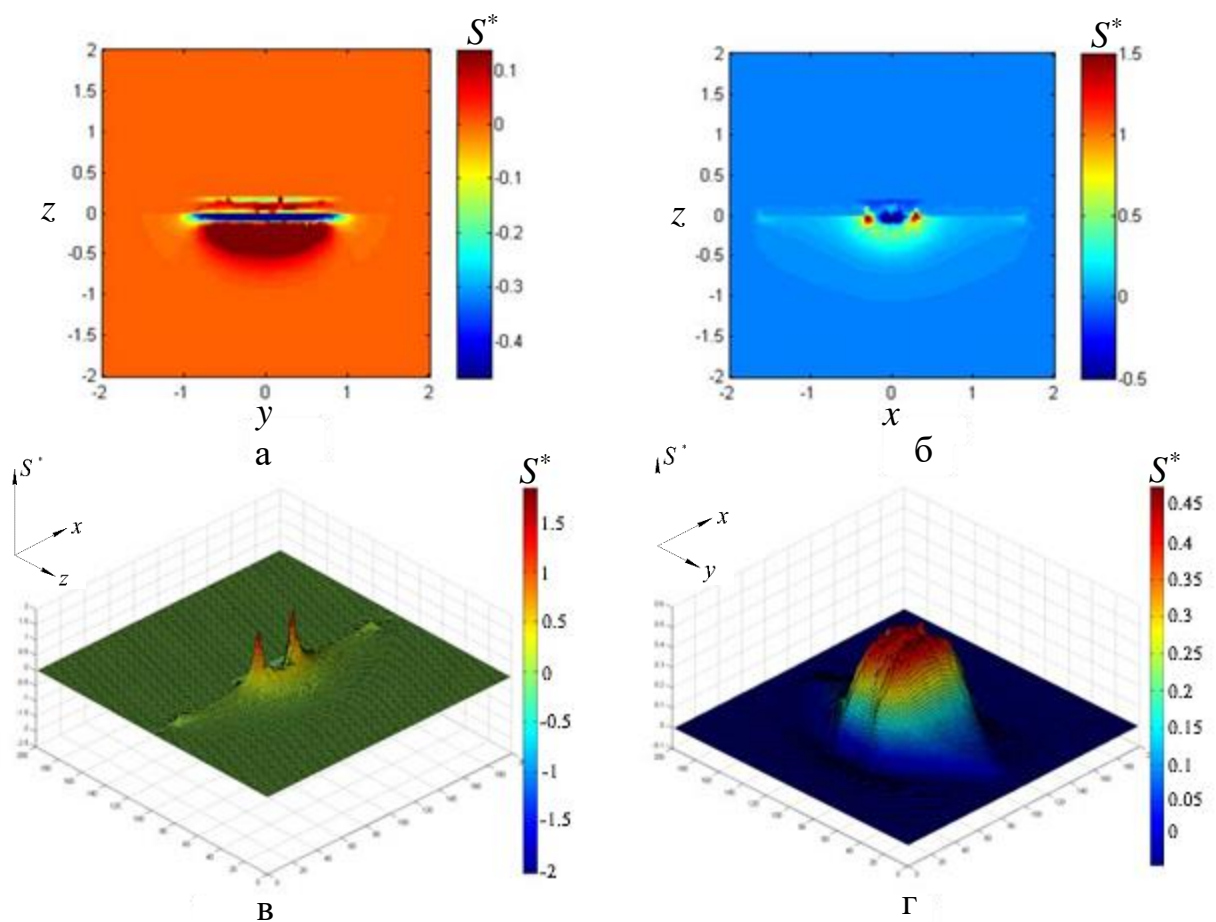


Рисунок 3.21 – Розподіл чутливості сенсора A у просторі: а – площина $x=0$; б – площина $y=0$; в – просторове представлення у площині $y=0$; г – просторове представлення у площині $z=-0,2$.

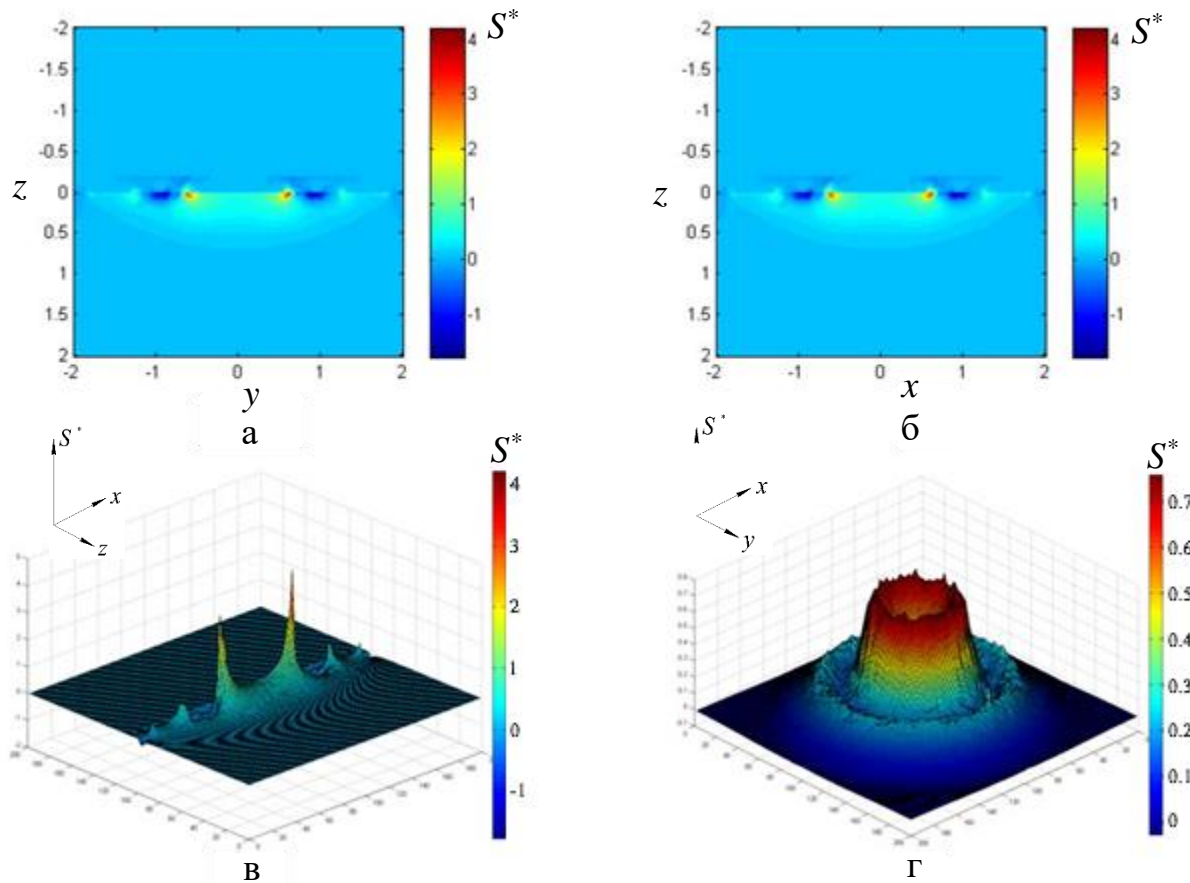


Рисунок 3.22 – Розподіл чутливості сенсора Ж у просторі: а – площина $x=0$; б – площина $y=0$; в – просторове представлення у площині $y=0$; г – просторове представлення у площині $z=-0,2$.

Як видно з рис. 3.22 максимальна чутливість сенсора Ж знаходиться на периферії між випромінюючим та приймаючим електродами. Для точної локалізації дефектів при НК важливо, щоб максимальна чутливість була у центрі сенсора. В зв'язку з цим сенсор Ж є небажаним для використання у неруйнівному контролі.

3.4.3 Розподіл чутливості сенсорів

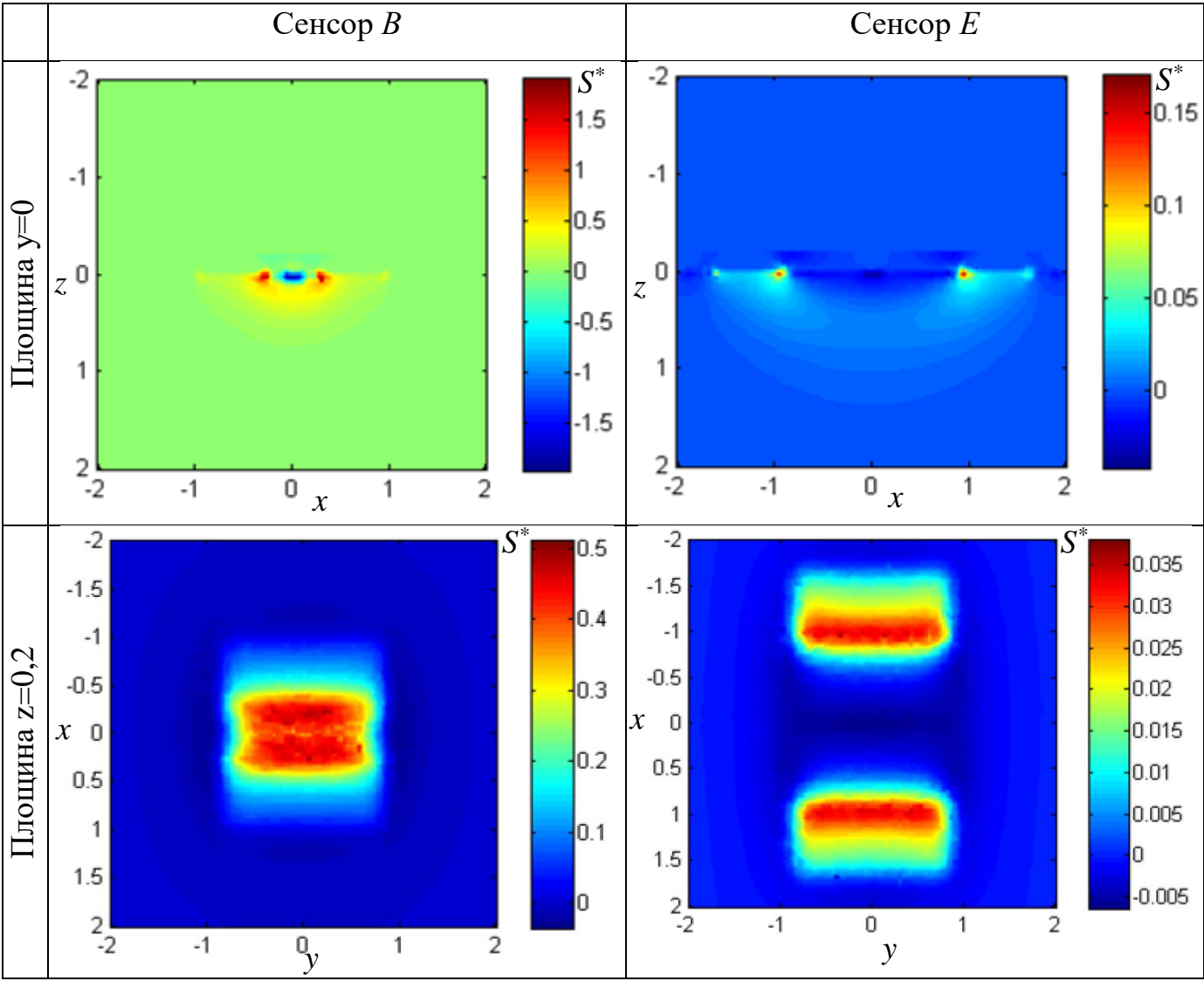
Розподіл чутливості можна використати в якості прикладного інструменту для оцінки характеристики сенсора і перевірки принципів

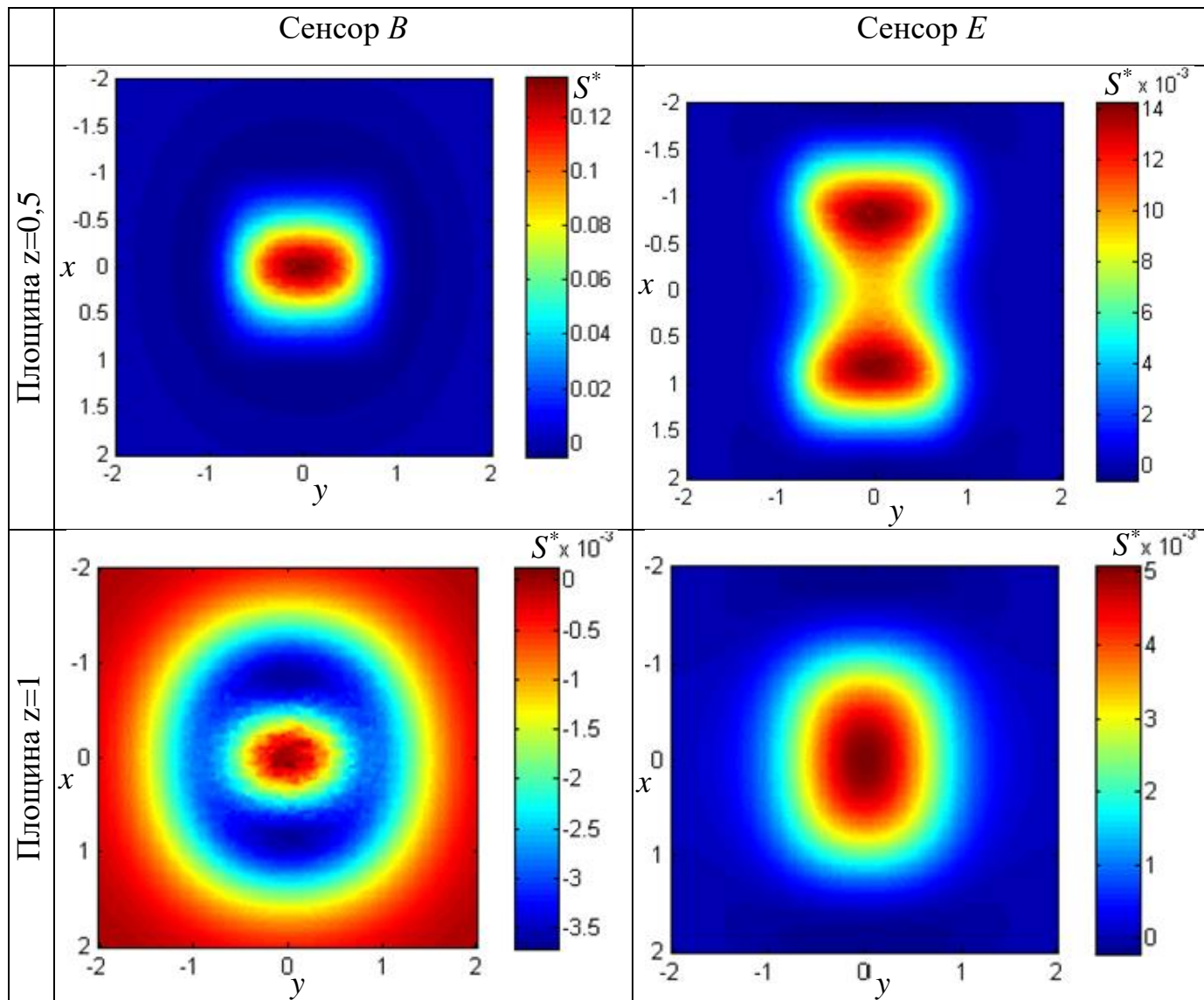
конструювання, адже він забезпечує панорамний вид на чутливість сенсора [126].

З метою дослідження впливу взаємного розташування електродів було досліджено розподіли чутливості сенсорів B та E , це сенсори з прямокутними електродами з різною відстанню між випромінюючим та приймаючим електродами, а саме: 6 мм у випадку сенсора B та 28 мм у випадку сенсора E .

Результати дослідження впливу взаємного розташування електродів наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння розподілів чутливості сенсорів B та E



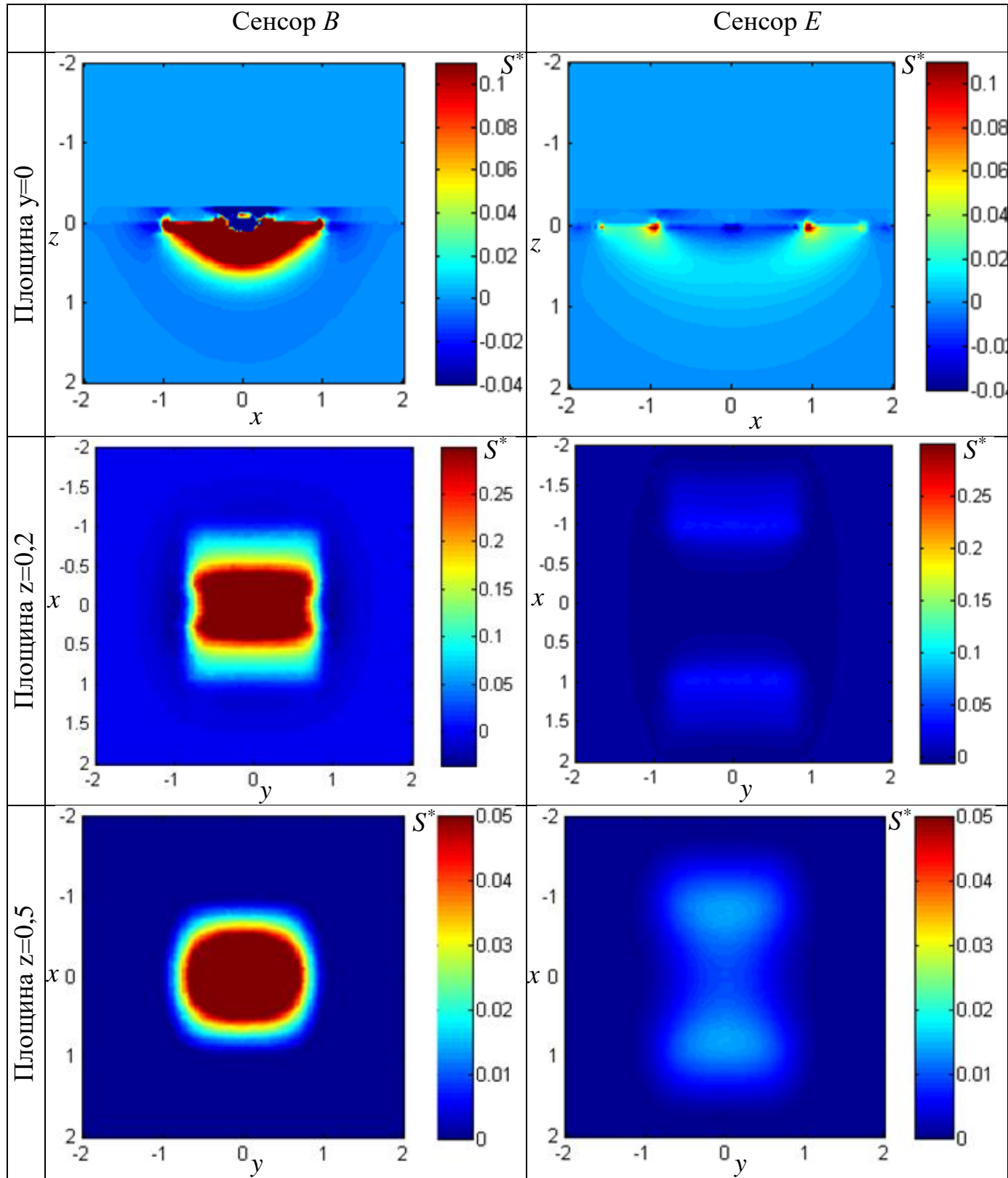


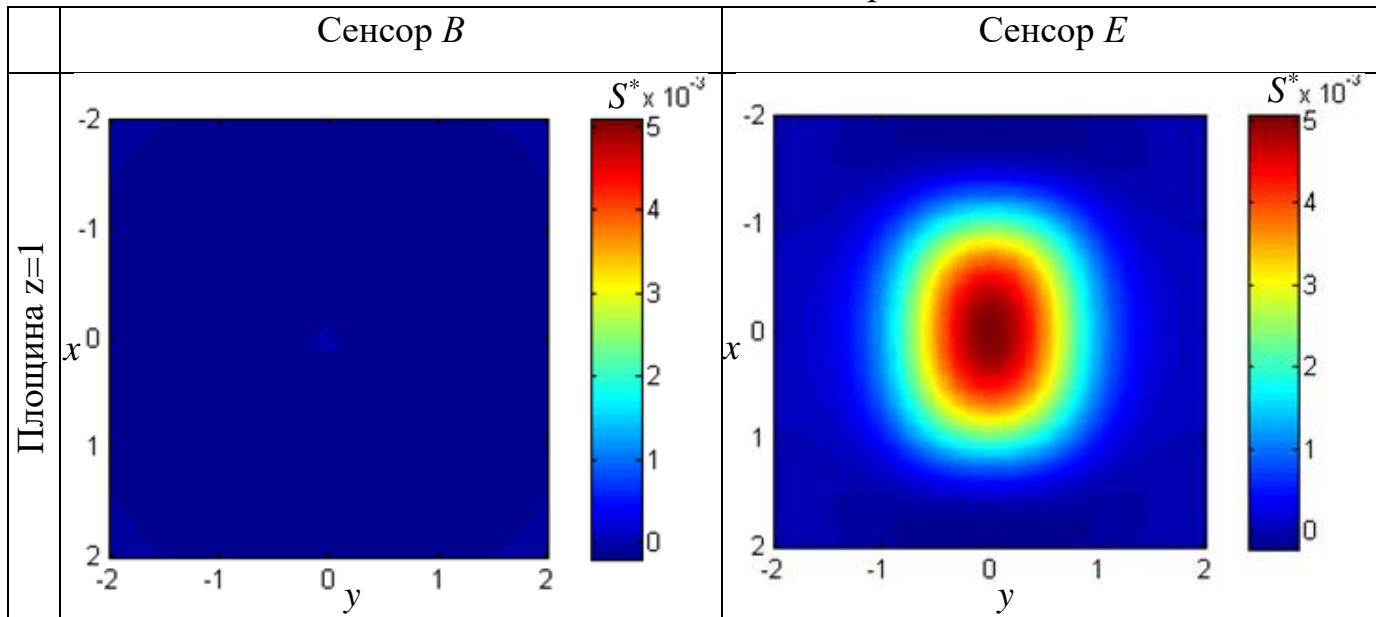
Як видно з табл. 3.1 розподіли чутливості різних сенсорів значною мірою відрізняються. Проте їх адекватне порівняння неможливе в зв'язку з різними масштабами шкали чутливості.

Для адекватного порівняння розподілу чутливості сенсорів необхідно привести діаграми, які наведені у табл. 3.1, до одного масштабу шкали чутливості.

У табл. 3.2 наведено співставлення розподілу чутливості сенсорів B та E з однаковими масштабами шкали чутливості для дослідження впливу взаємного розташування електродів.

Таблиця 3.2 – Порівняння розподілів чутливості сенсорів B та E з однаковим масштабом шкали чутливості





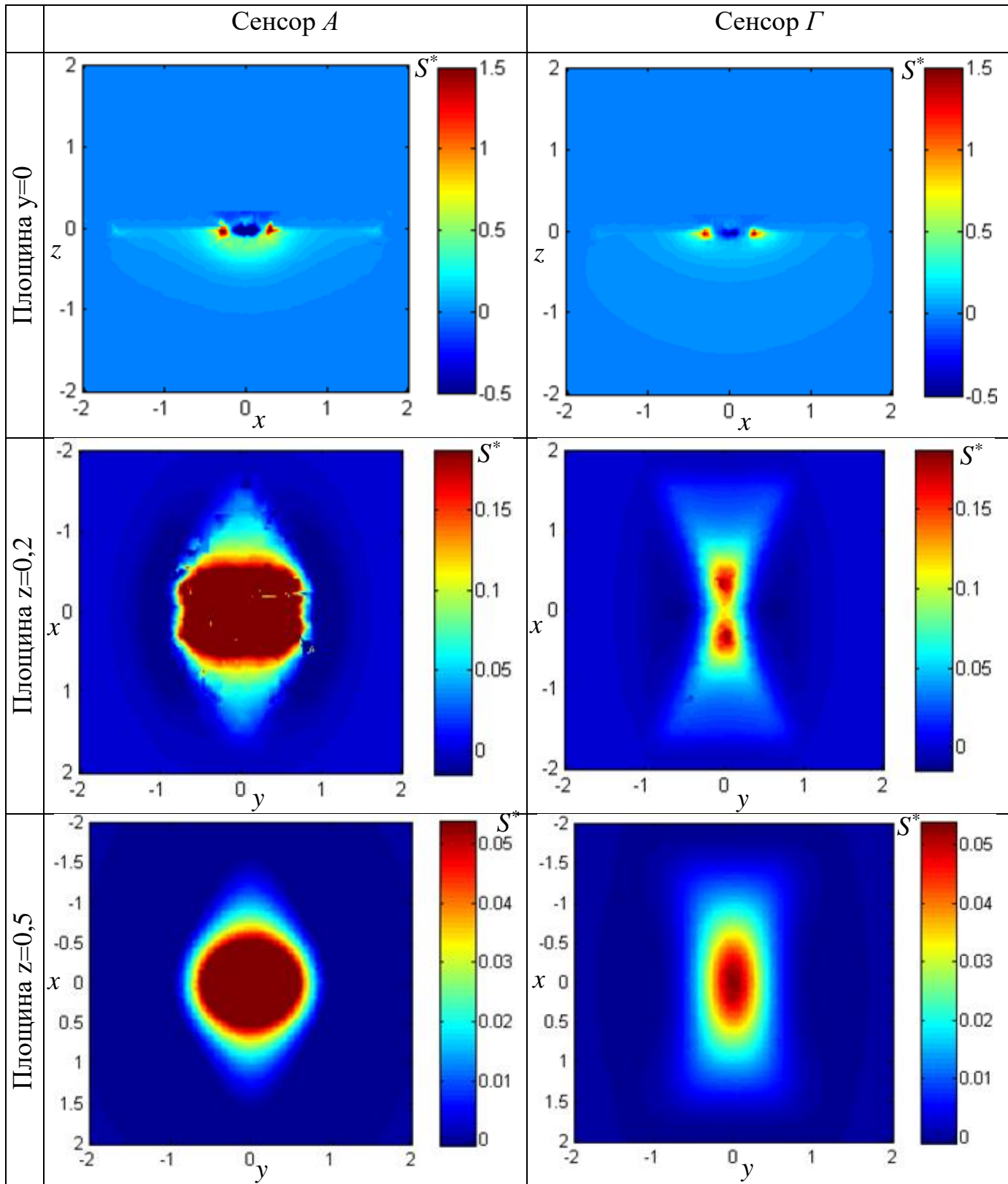
Як показав аналіз результатів, наведених у табл. 3.2, глибина проникнення сигналу сенсора E на 80% більша, ніж у сенсора B . Але, на невеликій глибині (до $1H$) рівень сигналу сенсора B на 133% вищий. На основі порівняння, можна зробити висновок, що менша відстань між електродами призводить до збільшення рівня сигналу, але зменшує глибину проникнення.

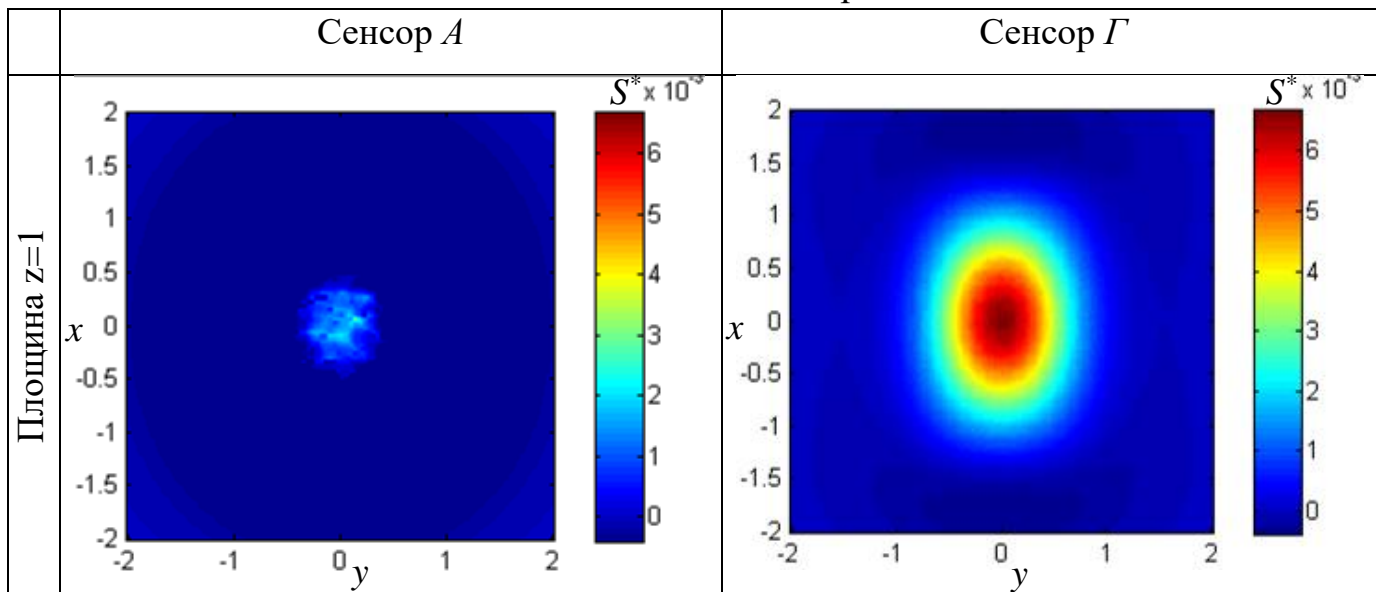
Таким чином, в залежності від особливостей застосування можливе використання різних конструкцій прямокутного сенсора. При необхідності здійснення контролю на великій глибині доцільно застосовувати сенсор E , а при необхідності пошуку дрібних дефектів на невеликій глибині доцільно застосовувати сенсор B .

З метою визначення оптимальних конструктивних параметрів будови трикутних сенсорів здійснено дослідження розподілу чутливості сенсорів A та Γ (рис. 3.17).

Результати дослідження розподілу чутливості трикутних сенсорів наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння розподілів чутливості сенсорів A та Γ

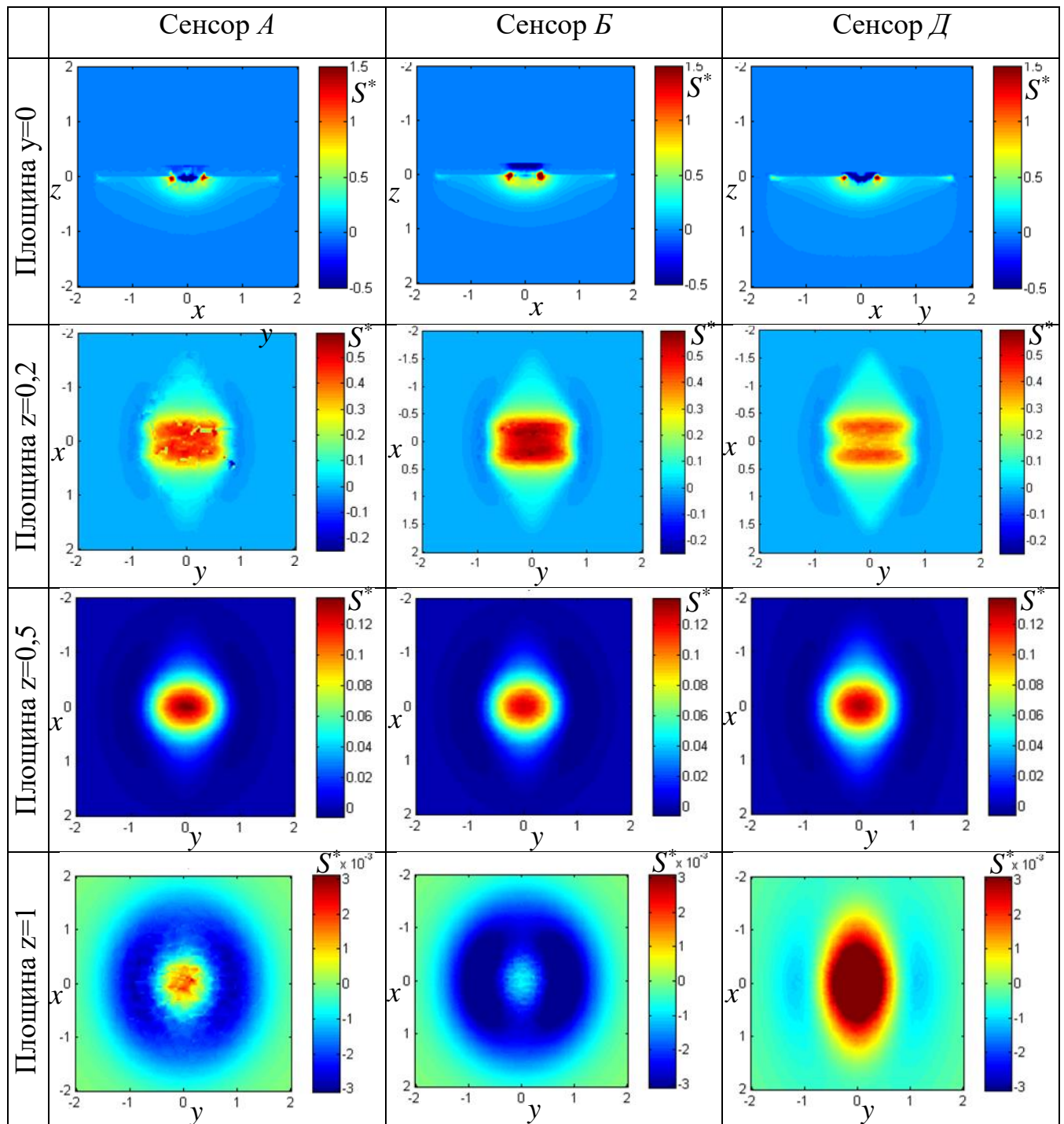




Як показав аналіз результатів, наведений у табл. 3.3, глибина проникнення сигналу сенсора Γ на 45% більша, ніж у сенсора A . Але, на невеликій глибині контролю (до $1H$) рівень сигналу сенсора A лише на 10% вищий. На основі порівняння конструкції сенсорів з трикутними електродними, можна зробити висновок, що розташування електродів вершинами назустріч демонструє кращі результати.

Порівняння табл. 3.2 і табл. 3.3 показує, що розподіл чутливості сенсора A аналогічний розподілу чутливості сенсора B , але має більшу глибину проникнення на 240%. Розподіл чутливості сенсорів Γ також схожий на сенсор E , але має сильніший сигнал. Таким чином, можна зробити висновок, що трикутні пари електродів мають переваги над прямокутними сенсорами завдяки більшій глибині проникнення.

З метою визначення впливу захисних елементів на сенсорі було досліджено розподіли чутливості трикутних сенсорів A , B та D , у яких електроди мають захисні елементи (сенсор A) та захисні елементи відсутні (сенсори B та D), крім того, модель сенсора D має більш тонку діелектричну підкладку. Розподіл чутливості наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння розподілів чутливості сенсорів A , B та D 

Порівняння сенсорів, наведених у табл. 3.4 показує, що сенсор A має більшу глибину проникнення, ніж сенсор B на 30% через наявність захисного елемента, а глибина проникнення сенсора D додатково збільшується на 40% за рахунок зменшення товщини діелектричної підкладки.

З метою усунення недоліків сенсорів В та Е та поєднання позитивних характеристик сенсорів А та Г було запропоновано сенсор, геометрія якого наведена на рис. 3.23.

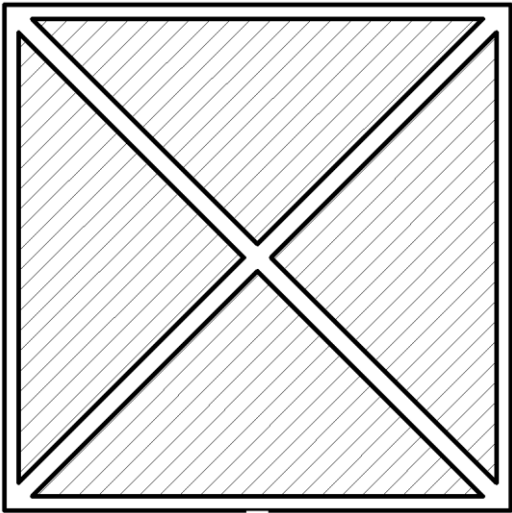
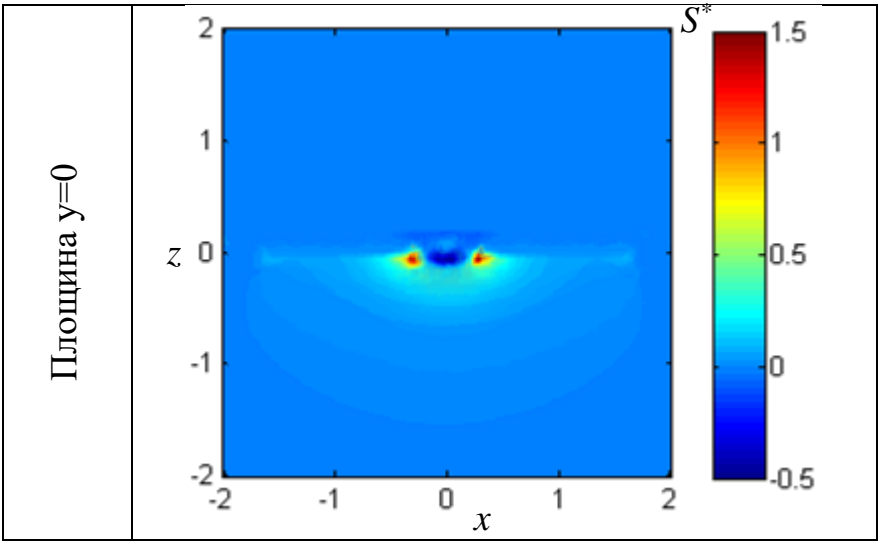


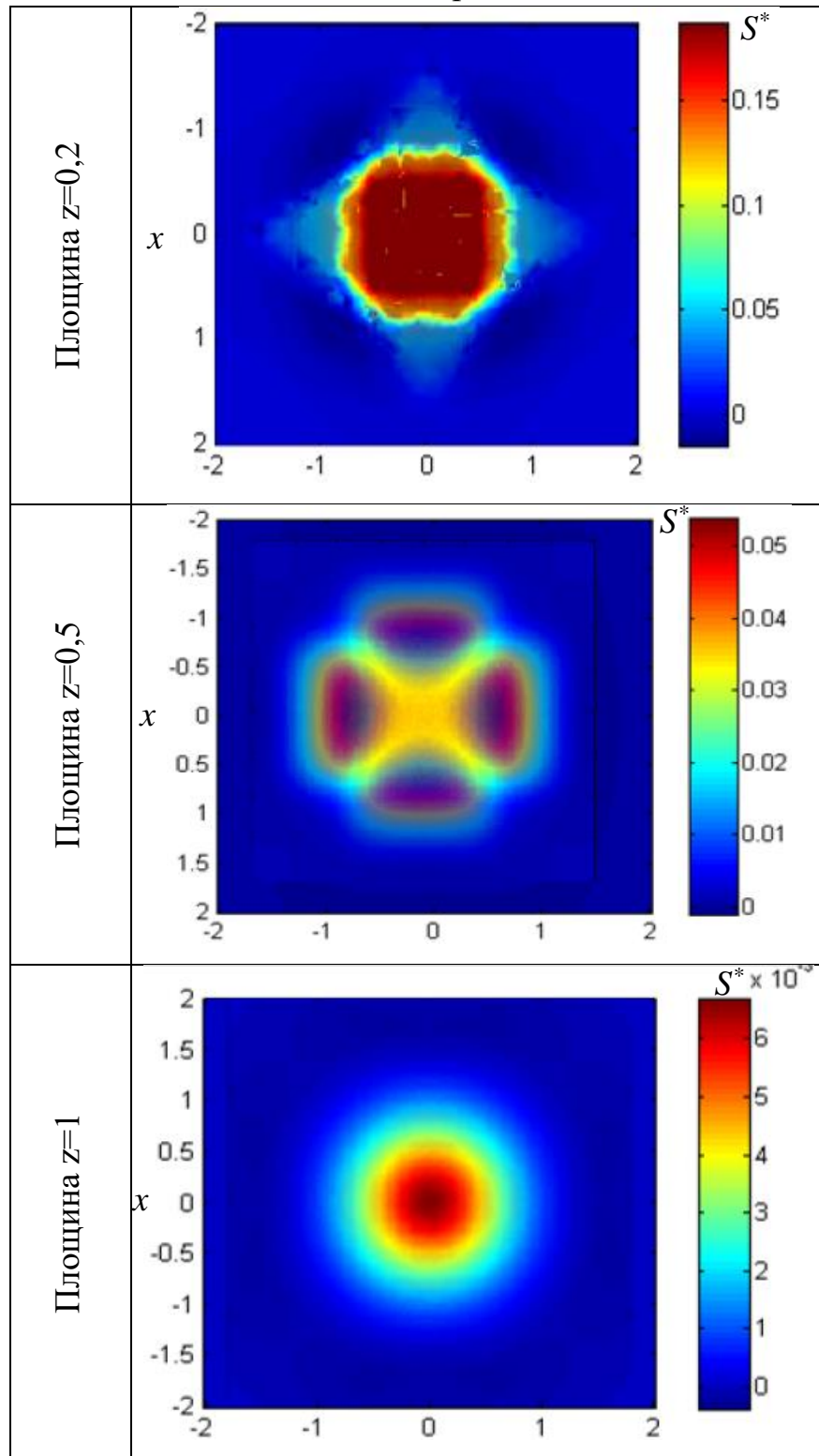
Рисунок 3.23 – Пропонована геометрія сенсора

Розподіл чутливості сенсора, зображеного на рис. 3.23 наведено у табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Розподіл чутливості сенсора пропонованої геометрії



Продовження таблиці 3.5



Як видно з табл. 3.5 пропонуваній сенсор має значну глибину контролю, як у випадку з сенсором Γ , але більшу на 50%, та високу чутливість, як у випадку з сенсором A , але більшу на 63%. Таким чином, пропонуваній сенсор

поєднує у собі переваги досліджених раніше сенсорів та є найкращим для застосування у НК.

3.5 Моделювання матеріалів зі змінними електропровідними властивостями

З метою визначення можливості застосування методу для знаходження дефектів у матеріалах зі змінними електропровідними властивостями було здійснено моделювання наномодифікованих полімерних композиційних матеріалів (НМІПКМ), що змінюють діелектричну проникність та провідність в залежності від концентрації наповнювача. Дослідження вимірювання концентрації двокомпонентних систем описано у роботі [129].

Для встановлення параметрів матеріалу були використані дані, отримані в праці [130], де автори досліджують механічні та електричні властивості НМІПКМ на прикладі поліетилену низької густини (ПЕНГ). Електричні властивості зразків автори вимірювали з використанням аналізатора імпедансу (Agilent 4294) та системи вимірювання діелектричних втрат (Ando TRS-10T) відповідно до стандартів ASTM D-149 та ASTM D-150. Найбільш корисні для даного дослідження дані щодо значень діелектричної проникності та питомої провідності матеріалу при різній концентрації вуглецевих нанотрубок (ВНТ), що наведені у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Електричні властивості НМІПКМ

Концентрація ВНТ	Діелектрична проникність	Питома провідність
0 % мас.	0,25	0 См/м
1 % мас.	12	0,01 См/м
3 % мас.	133	0,08 См/м
5 % мас.	539	0,1 См/м
10 % мас.	779	0,1 См/м

На рис. 3.24 зображено розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі при різній концентрації ВНТ, який отримано в результаті моделювання. При моделюванні використовувався дефект типу порожнина з розмірами $1H$ на $1H$.

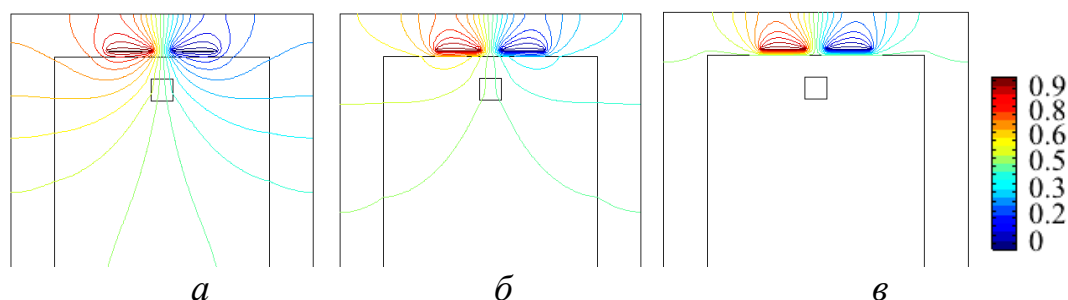


Рисунок 3.24 – Розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі при різній концентрації вуглецевих нанотрубок: *a* – 0 % мас.; *б* – 1 % мас.; *в* – 3 % мас.

З рис. 3.24 видно, що величина масової концентрації ВНТ у полімерному матеріалі значною мірою впливає на розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі.

Для узагальнення результатів дослідження залежності відносної ємності від глибини залягання дефекту при різній концентрації ВНТ, значення ємностей, отриманих при моделюванні були зведені до відносних величин. Було проведено ряд числових моделювань зі зміною глибини залягання дефекту в діапазоні від $1H$ до $10H$ при різних значенні концентрації ВНТ у ПЕНГ [131].

На рис. 3.25 наведено узагальнені результати числового моделювання у вигляді залежностей відносної електричної ємності між електродами сенсора від глибини залягання тестового дефекту при різній концентрації ВНТ у матеріалі.

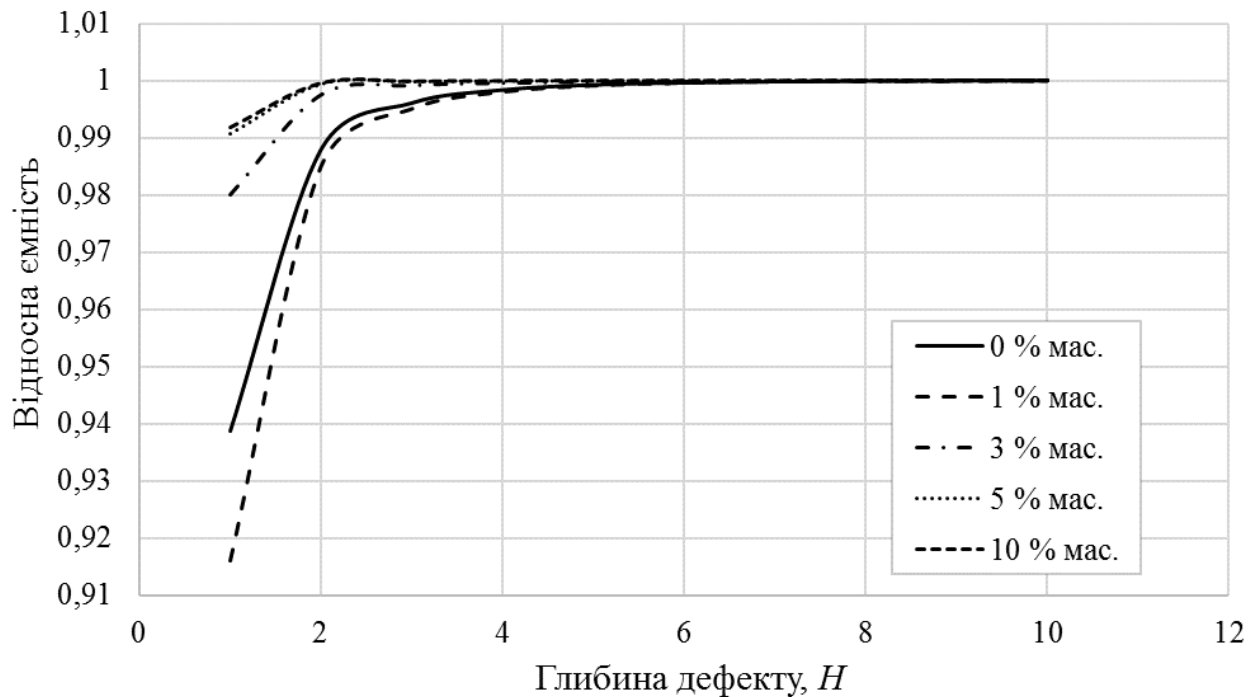


Рисунок 3.25 – Залежність відносної ємності від глибини залягання дефекту при різних концентраціях ВНТ

Як видно з рис. 3.25, відносна електрична ємність прямує до усталеного значення в залежності від концентрації ВНТ. При цьому збільшення концентрації ВНТ призводить до зміни характеру залежності відносної ємності нелінійно.

З метою визначення меж можливого застосування методу для кожної з досліджуваних концентрацій ВНТ було отримане значення максимальної глибини залягання дефекту, яка визначається з урахуванням порогового значення чутливості приладу у 1 % за умови

$$\frac{dC}{dH} \cdot 100 \% \geq 1 \% .$$

Отримані результати зображено на рис. 3.26 у вигляді функції $H(P\%)$, де

$P\%$ – масова концентрація ВНТ, для $\frac{dC}{dH} = 0,01$.

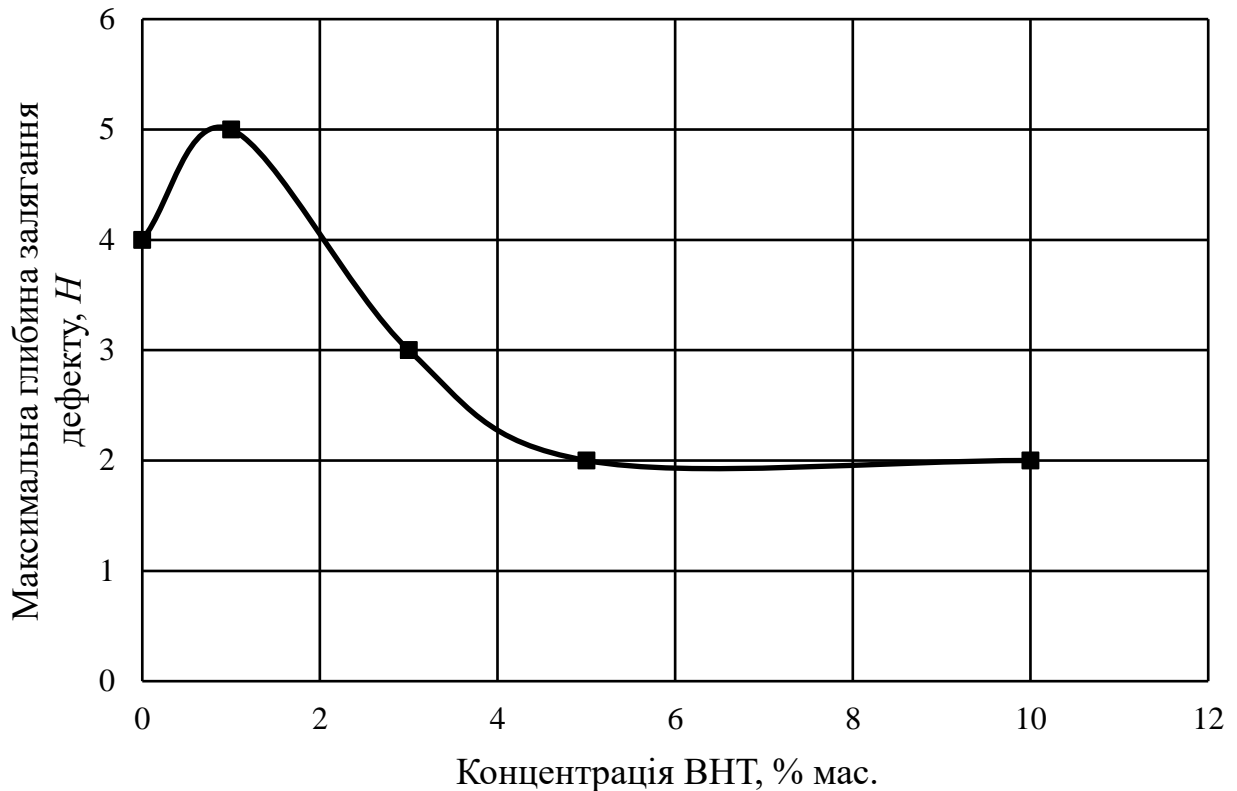


Рисунок 3.26 – Залежність максимальної глибини залягання дефекту від концентрації ВНТ

Апроксимація залежності, зображеної на рис. 3.26, при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$ в діапазоні концентрації ВНТ від 0 % мас. до 10 % мас.

$$H = \begin{cases} 0,16x^3 - 1,3x^2 + 2,1417x + 4, & \text{при конц. ВНТ} \leq 5 \% \text{ мас.} \\ 2, & \text{при конц. ВНТ} > 5 \% \text{ мас.} \end{cases}$$

Як видно з рис. 3.26, при концентрації ВНТ 1 % мас. чутливість системи найбільша та дозволяє виявляти дефекти на глибині до $5H$, при подальшому збільшенні концентрації максимальна глибина залягання дефекту зменшується до $2H$.

Контроль виробів з НМІПКМ не завжди можливий зі збереженням мінімального робочого зазору. Для визначення впливу робочого зазору було проведено ряд моделювань з відстанню від $0,03H$ до $0,5H$ при різних значенні концентрації ВНТ у ПЕНГ.

На рис. 3.27 наведено узагальнені результати моделювання в вигляді залежностей відносної електричної ємності між електродами від робочого зазору при різній концентрації ВНТ у матеріалі.

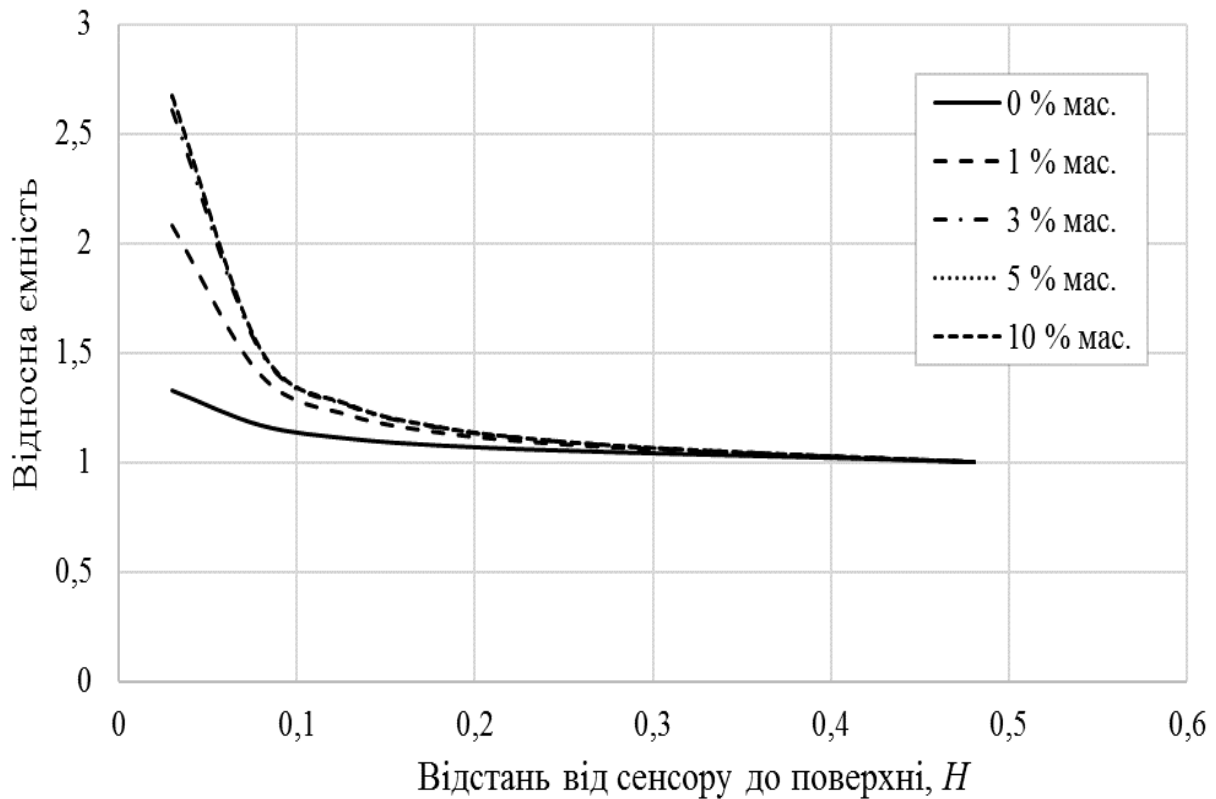


Рисунок 3.27 – Залежність відносної ємності сенсора від робочого зазору при різній концентрації ВНТ

Як видно з рис. 3.27, відносна електрична ємність сенсора прямує до усталеного значення в залежності від концентрації ВНТ.

При дослідженні залежності відносної електричної ємності між електродами від робочого зазору при різній концентрації ВНТ у матеріалі значення критерію Кохрена склало $G=0,422$, що не перевищує критичне значення, яке становить $G_{кр}=0,602$ ($k=10$, $\nu=1$), при довірчій ймовірності 95 %.

З метою визначення меж можливого застосування методу для кожної з досліджуваних концентрацій ВНТ було отримане граничне значення робочого зазору. Отримані результати зображено на рис. 3.28.

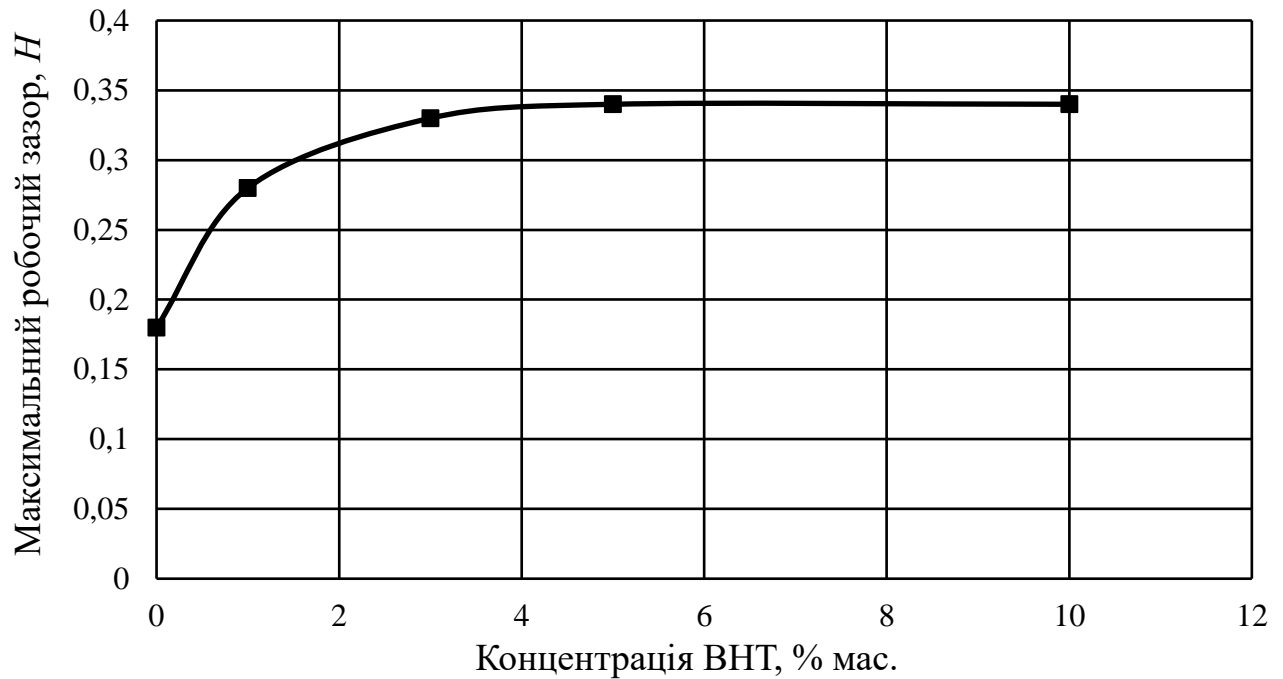


Рисунок 3.28 – Залежність максимального робочого зазору від концентрації ВНТ

Апроксимація залежності, зображеної на рис. 3.28, при величині достовірності апроксимації $R^2=0,98$ в діапазоні концентрації ВНТ від 0 % мас. до 10 % мас.

$$H = \begin{cases} 1,1 \cdot 10^{-3} x^3 - 0,02x^2 + 0,101x + 0,19, & \text{при конц. ВНТ} \leq 5 \text{ \% мас.} \\ 0,34, & \text{при конц. ВНТ} > 5 \text{ \% мас.} \end{cases}$$

Як видно з рис. 3.28, чутливість системи збільшується при збільшенні концентрації ВНТ, набуваючи свого максимального усталеного $0,33H$ значення при концентрації ВНТ 5 % мас.

Проведене дослідження продемонструвало певні обмеження щодо контролю дефектів у НМІПКМ електроємнісим методом неруйнівного контролю. Зокрема, можливість виявляти дефекти на глибині залягання не більше $5H$ при концентрації ВНТ 1 % мас. При цьому максимальний робочий зазор становить $0,33H$ при концентраціях ВНТ більше 5 % мас.

Недоліком дослідження є відсутність деталізації результатів на вуглецеві нанотрубки різної структури, зокрема одностінні та багатостінні. Проте,

електричні властивості різних структур ВНТ відрізняються незначно, тому результати поширюються на різні структури ВНТ.

Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні технологічних регламентів виробництва НМПКМ, а також при створенні комплексних пристроїв для неруйнівного контролю.

Аналізуючи графік залежності відносної ємності від робочого зазору (рис. 3.27), можна зробити висновок, що при малому робочому зазорі сенсора спостерігається сильна залежність як від концентрації так і від відстані. Це може бути використано для контролю концентрації ВНТ в точці контролю при фіксованій відстані.

3.6 Моделювання процесу контролю глибини розташування інтелектуального датчика

При моделюванні використовувалися електроди у формі прямокутників з нульовою товщиною. Передбачалося, що довжина прямокутного електрода набагато більша, ніж ширина, таким чином розподіл електричного поля уздовж довжини можна вважати постійним і він не буде залежати від кінцевих полів. Виходячи з цього, 3D-геометрія задачі може бути зведена до 2D моделі, яка може бути використана для відображення задачі. В зв'язку з цим моделювання проводилося у двовимірній планарній постановці [132].

Для уніфікації розрахунків було введено відносну величину «Н», всі геометричні розміри задавалися відносно цієї величини:

- електроди – ширина $2H$, відстань між електродами $2H$;
- виріб з ПКМ – ширина $25H$, висота $100H$;
- інтелектуальний датчик у вигляді матеріальної точки по центру виробу на глибині від $1H$ до $100H$.

Геометрія 2D моделі ПКМ з введеним інтелектуальним датчиком наведена на рис. 3.29.

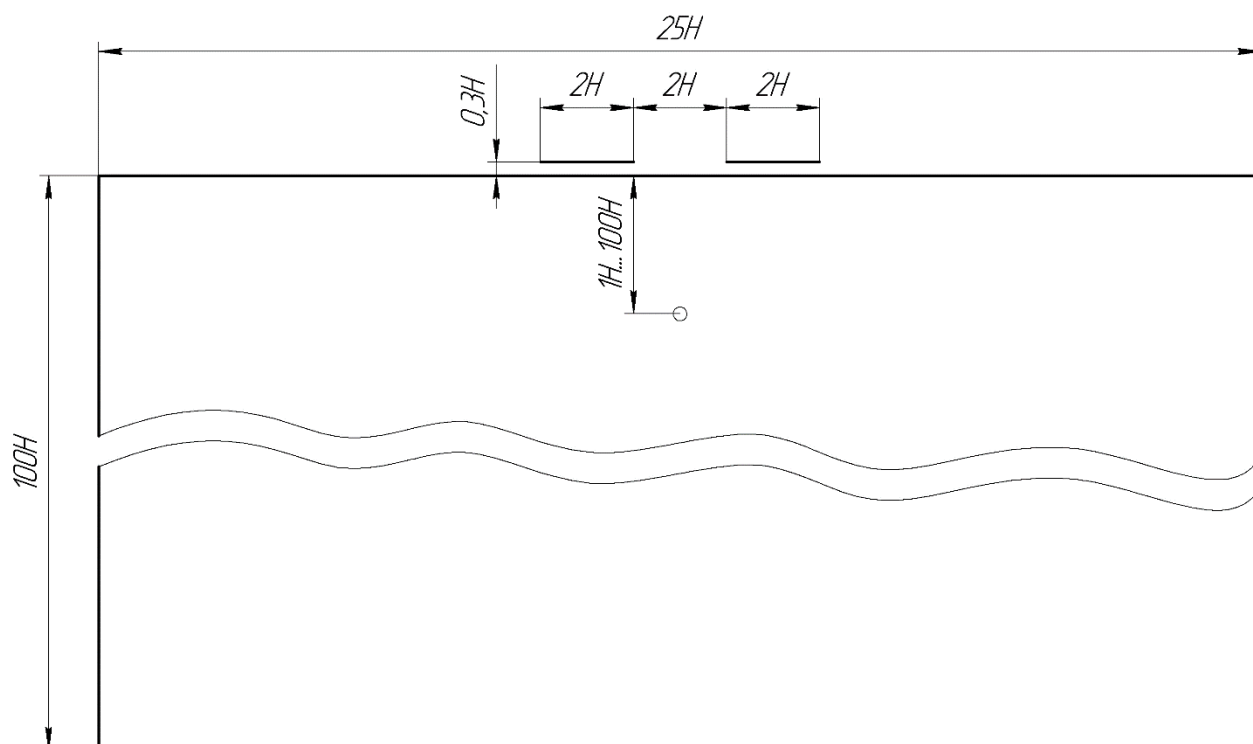


Рисунок 3.29 – Конструктивні розміри моделі ПКМ з введеним інтелектуальним датчиком

При проведенні моделювання використовувалися такі матеріали:

1. Повітря, діелектрична проникність $\epsilon_r=1$.
2. Поліетилен низького тиску, $\epsilon_r=2,3$.

З метою визначення мінімально необхідної густоти розрахункової сітки для отримання якісного результату розрахунку проводилося дослідження збіжності сітки за допомогою поступового зменшення характерного розміру елемента та співставленням контрольного параметра при різних значеннях граничних розмірів елемента. В якості контрольного параметра використовувалося значення електричної ємності між електродами [133].

При побудові скінченно-елементної моделі доцільно використовувати елементи, розмір яких достатньо малий, щоб суттєво не впливати на контрольний параметр, але не занадто малий, щоб значно не збільшувати час розрахунку. Тому, при побудові даної скінченно-елементної моделі було використано розбиття скінченно-елементної сітки на 15574 елементів. В

областях розташування електродів та в області розташування інтелектуального датчика здійснено згущення розрахункової сітки.

Сітка перебудовувалася при кожному моделюванні в зв'язку з новим місцем розташування датчика. На рис. 3.30 наведено скінченно-елементну сітку моделі.

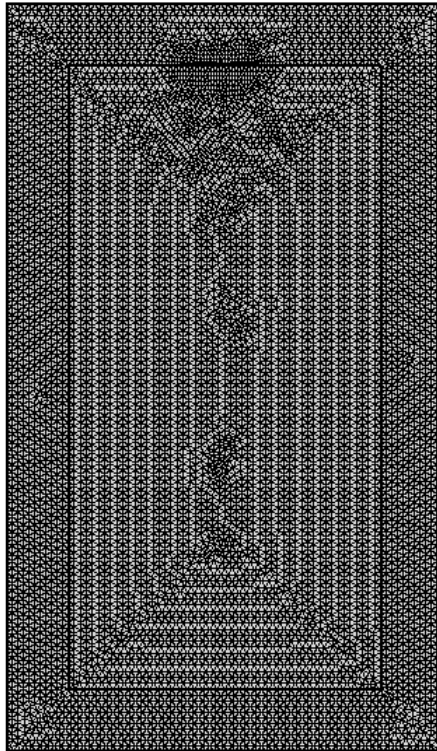


Рисунок 3.30 – Скінченно-елементна сітка моделі ПКМ з введеним інтелектуальним датчиком

Моделювання проводилося за таких граничних умов:

- початкове значення електричного потенціалу $V_0=0$ В;
- електричний потенціал на опорному електроді $V_d=20$ В;
- електричний потенціал на вимірюючому електроді $V_s=0$ В;
- електричний потенціал на інтелектуальному датчика $V_{\text{sensor}}=0$ В.

На рис. 3.31 зображено розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі при різній глибині розташування інтелектуального датчика у полімерному матеріалі.

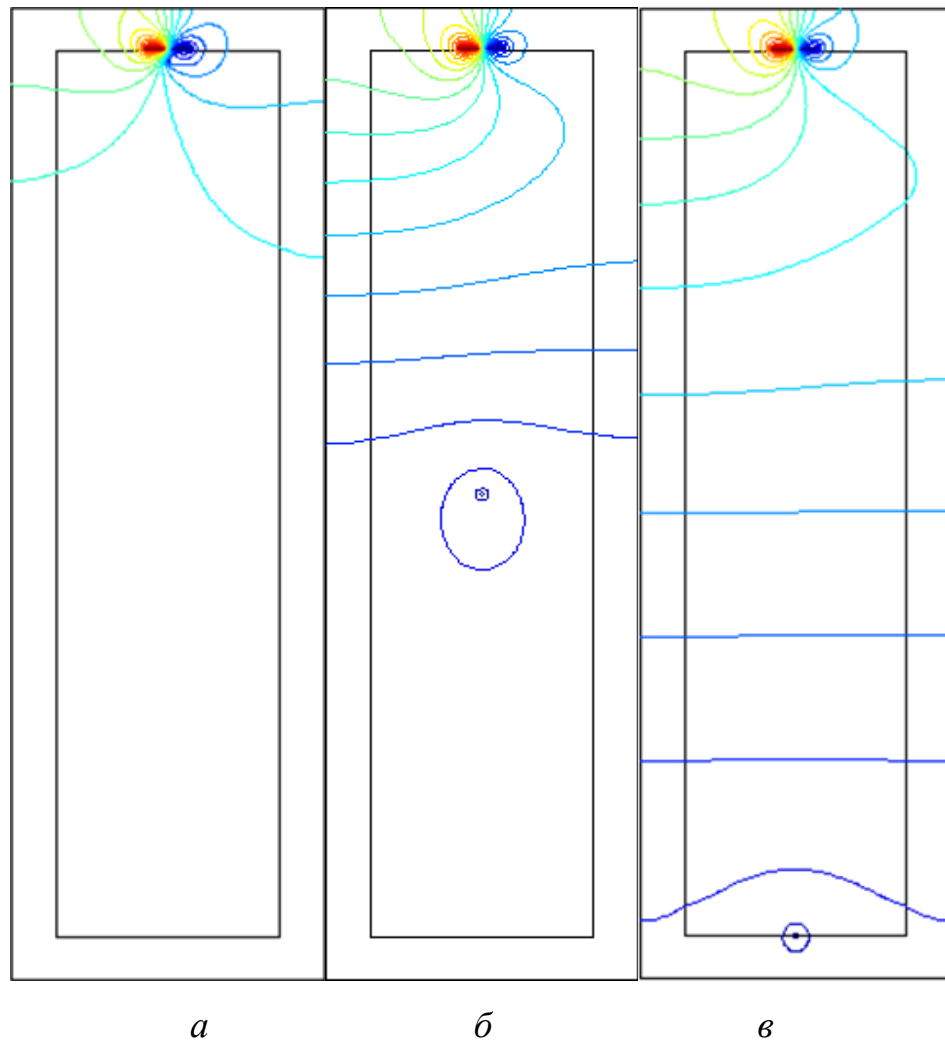


Рисунок 3.31 – розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі: *а* – глибина розташування датчика 1Н; *б* – глибина розташування датчика 50Н; *в* – глибина розташування датчика 100Н

З рис. 3.31 видно, що глибина розташування інтелектуального датчика впливає на розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі. Тому необхідно визначити величину впливу глибини розташування датчика на цей розподіл.

Було проведено числове дослідження залежності відносної електричної ємності між електродами від глибини розташування інтелектуального датчика у матеріалі.

На рис. 3.32 наведено узагальнені результати моделювання у вигляді залежності відносної електричної ємності між електродами від глибини розташування інтелектуального датчика.

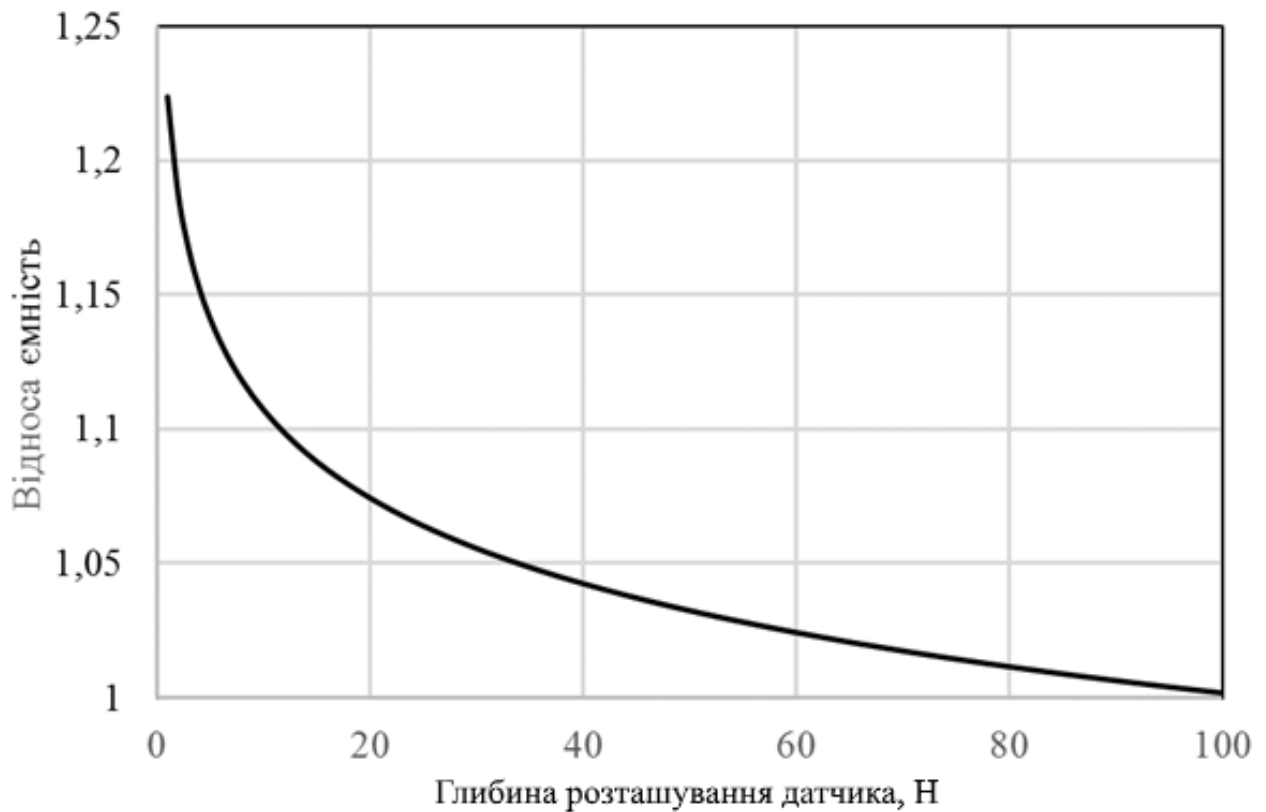


Рисунок 3.32 – Узагальнені результати моделювання глибини розташування датчика

Як видно з рис. 3.32 відносна електрична ємність прямує до свого усталеного значення нелінійно.

З метою оцінки чутливості електродів до інтелектуального датчика було здійснено дослідження залежності розбіжності відносних електричних ємностей від глибини розташування датчика.

Результати дослідження залежності розбіжності відносних електричних ємностей від глибини розташування датчика зображено на рис. 3.33.

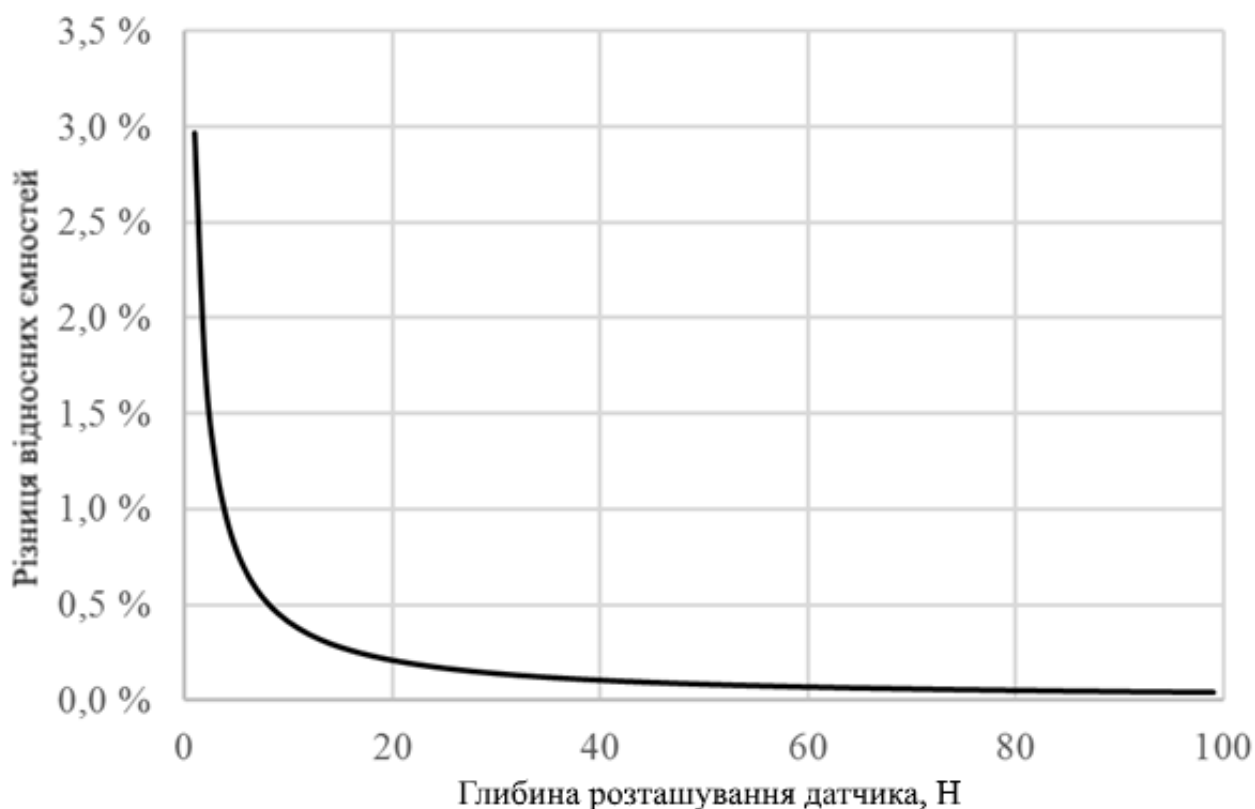


Рисунок 3.33 – Залежність розбіжності відносних електричних ємностей від глибини розташування датчика

Як видно з рис. 3.33, при глибині розташування датчика більше $40H$ його ідентифікація буде практично не можлива.

Проведене дослідження продемонструвало певні обмеження щодо створення інтелектуальних ПКМ з боку їх геометричних розмірів та глибини розташування датчиків, враховуючи необхідність отримання сигналів з них [134].

Встановлено, що при глибині розташування інтелектуального датчика у поліетилен низького тиску більшій за $40H$, отримання сигналів з такого датчика є практично неможливим. Таким чином, збільшення граничної глибини розташування датчика для можливості здійснення контролю може досягатися або збільшенням характерних розмірів електродів, що не завжди можливо, або зміною діелектричної проникності ПКМ шляхом введення у полімерну матрицю модифікаторів які змінюють електричні властивості.

Також дослідження підтвердило необхідність розгляду проблеми введення інтелектуальних датчиків у ПКМ не тільки з точки зору конструктивного оформлення та технологічних параметрів переробного обладнання (екструдерів, литтєвих машин) [135]. При моделюванні процесів, що протікають у обладнанні, не розкрито взаємодію датчиків з ПКМ і необхідність подальшого неруйнівного контролю виробів [8]. Важливим є розгляд проблеми з огляду на електричні властивості полімерних матеріалів та можливості приладів та систем неруйнівного контролю, за допомогою яких отримуються сигнали про глибину розташування цих датчиків.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі отримано наступні результати:

1. Розроблено математичну модель процесу електроємнісного контролю дефектів у виробах на основі рівнянь Максвелла-Ампера. Математична модель була застосована до безрозмірних планарної 2D та 3D геометрій моделей ОК з дефектами різної типів.

2. Досліджено параметри процесу контролю та межі застосування методу для електропровідних та непровідних зразків, зокрема: товщина об'єкту контролю, робочий зазор, діелектрична проникність зразка. Для діелектричних зразків при проведенні контролю з заземленою підкладкою максимально можлива товщина об'єкту контролю, за якої можливе виявлення дефекту, становить $11H$, де H - відносна величина. При контролі без заземленої підкладки ця величина становить $5H$. Для провідних зразків, як показало моделювання, сенсор нечутливий до товщини. Максимальний робочий зазор при проведенні контролю діелектричного зразка, за якого можливе виявлення дефекту, становить $3H$, а при контролі провідного зразка $18H$. Вплив діелектричної проникності при проведенні контролю непровідних зразків різний, можна виділити три випадки: $\varepsilon < 5$ відсутність заземленої підкладки

дозволяє отримати більш високу чутливість; $5 < \epsilon < 6$ контроль можливий лише без заземленої підкладки; $\epsilon > 6$ наявність заземленої підкладки дозволяє отримати більш високу чутливість. Здійснено моделювання контролю дефектів типу виступ, вузький та широкий жолоб.

3. Моделювання параметрів сенсора, а саме розподілу чутливості, дозволило порівняти сенсори різної геометричної форми та визначити оптимальні конструктивні параметри за критерієм чутливості. Запропоновано конструкцію ємнісного сенсора, яка забезпечує досягнення найвищої чутливості. Пропонований сенсор має на 50% більшу глибину контролю та на 63% більшу чутливість ніж зі стандартними сенсорами. Таким чином, пропонований сенсор поєднує у собі переваги досліджених раніше сенсорів та є найкращим для застосування у неруйнівному контролі.

4. Моделювання процесу контролю матеріалів зі змінними електропровідними властивостями, зокрема наномодифікованих полімерних композитів, підтвердило можливість застосування розробленого методу для такого класу матеріалів. Проведене дослідження продемонструвало певні обмеження щодо контролю дефектів у таких матеріалах електроємнісним методом. Зокрема, можливість виявляти дефекти на глибині залягання не більше $5H$ при концентрації вуглецевих нанотрубок 1% мас. При цьому максимальний робочий зазор становить $0,33H$ при концентраціях вуглецевих нанотрубок більше 5% мас.

5. Проведено моделювання процесу контролю глибини розташування інтелектуального датчика у матеріалі. Встановлено, що при глибині розташування інтелектуального датчика у поліетилені низького тиску більшій за $40H$, отримання сигналів з такого датчика є практично неможливим. Таким чином, збільшення граничної глибини розташування датчика для можливості здійснення контролю може досягатися або збільшенням характерних розмірів електродів, що не завжди можливо, або зміною діелектричної проникності

полімерного матеріалу шляхом введення у полімерну матрицю модифікаторів які змінюють електричні властивості.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ

4.1 Лабораторна установка

Експериментальні дослідження проводились на лабораторній базі кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського. Лабораторна установка для дослідження електроємнісного методу неруйнівного контролю зображена на рис. 4.1.

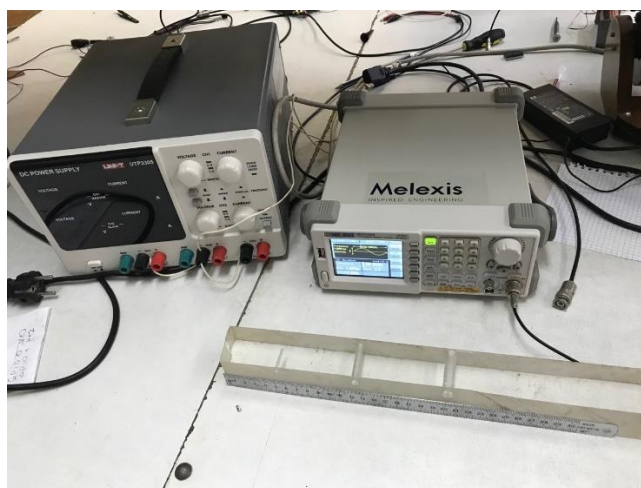


Рисунок 4.1 – Лабораторна установка

В якості дослідного об'єкта застосовувався зразок з поліметилметакрилату (ПММА, плексиглас) з габаритами 40x38x400 мм (рис. 4.2) в якому зімітовано дефекти декількох типів.



Рисунок 4.2 – Дослідний зразок з ПММА

Дослідження проводились наступним чином: на лабораторний стіл кладеться мідна пластина, яка виконує роль екрану. На мідну пластину накладається діелектрик, щоб унеможливити неконтрольоване замикання джерела сигналу на землю. Випромінювач електричних сигналів, металевий кутник, кладеться на діелектричну підкладку, яка відділяє його від контакту із землею, земля від генератора сигналу підключена до мідної пластини, а сигнальний провід до кутника.

На рис. 4.3 представлена базова структурна схема сенсора ЕРІС з вхідним електронним каскадом [136]. Розмір його електрода вибирається довільно і залежить від вхідної ємності, яка визначається конкретним застосуванням. Для пристроїв, що знаходяться в декількох метрах від вимірюваного об'єкта, ємнісний зв'язок визначається тільки власною ємністю електрода, а їх характеристика значною мірою залежить від вхідного імпедансу при взаємодії об'єкту з полем. При цьому слід врахувати, що в активному режимі сенсор ЕРІС відбирає з поля дуже малу кількість енергії.

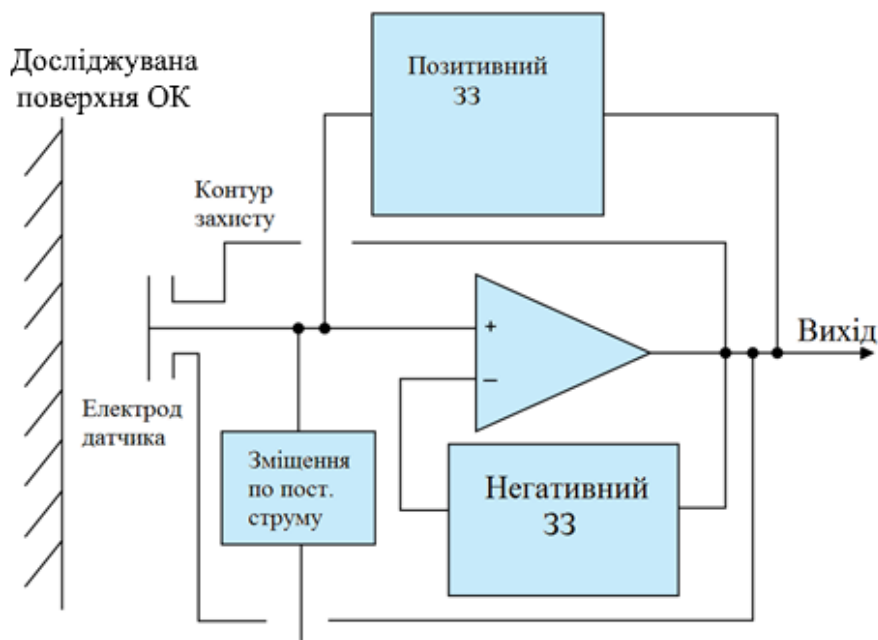


Рисунок 4.3 – Базова структурна схема сенсора ЕРІС

Вхідний опір пристрою підвищується з допомогою зворотного зв'язку, а зниження вхідної ємності досягається за рахунок методів захисту. Вхідну ємність можна знизити до 10^{-17} Ф, а вхідний опір збільшити до 10^{15} Ом, звівши взаємодію з вимірюваним полем до мінімуму, коли залишаються тільки малі струми зміщення. Вхідний каскад підсилювача зображено на рис. 4.4.

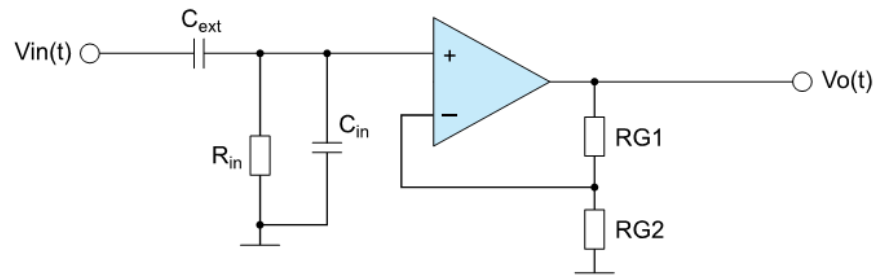


Рисунок 4.4 – Вхідний каскад підсилювача сенсора EPIC

Схема підключення сенсора зображена на рис. 4.5, а вигляд плати з сенсорами на рис. 4.6.

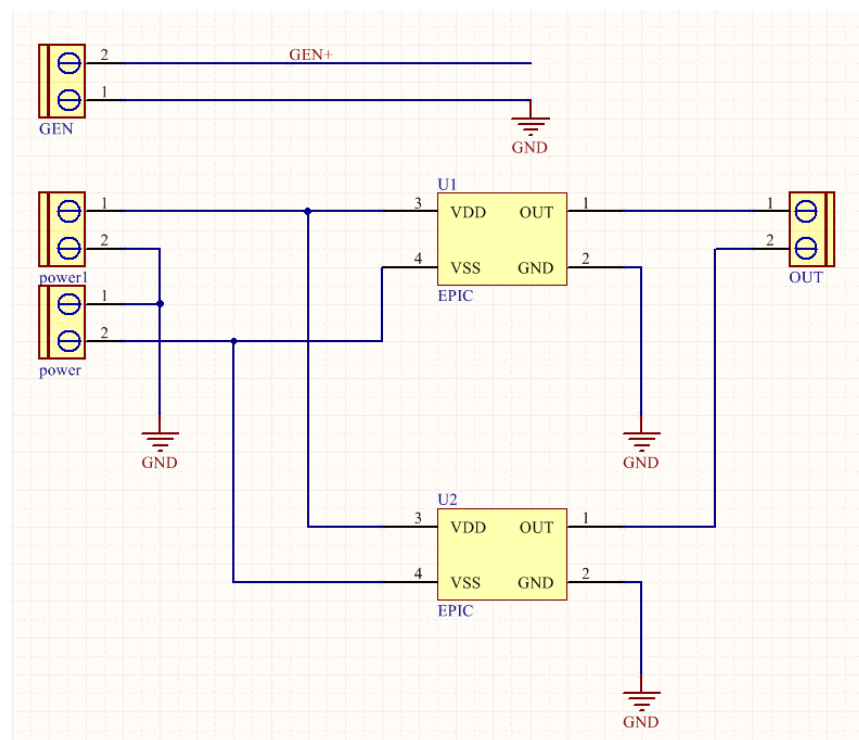


Рисунок 4.5 – Електрична схема плати

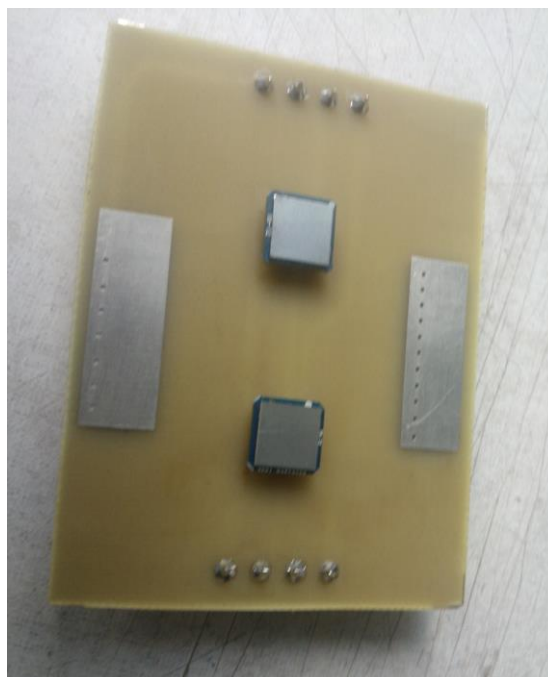


Рисунок 4.6 – Вигляд плати с сенсорами

При проведенні дослідження із сенсорами ЕРІС в лабораторних умовах було враховано наступні особливості і виконано такі вимоги:

1. Кожний прилад який підключається до мережі змінного струму є джерелом електричної наводки.
2. Людське тіло є чудовим провідником будь-яких електричних сигналів. Тіло людини має порівняно малий опір і слугує джерелом сигналу.
3. Для усунення наводок мережі (або інших сторонніх сигналів) всі прилади/пристрої які стоять поруч або увімкнені повинні мати спільне з'єднання (заземлені).
4. Столи на яких виконуються дослідницькі роботи повинні бути підключенні до спільної системи приладів (заземлені).
5. При дослідах необхідно правильно прикладати/формулювати поле щоб результати вимірювання відображали реальний стан об'єкту контролю.
6. Від точності позиціювання сенсорів залежить отриманий результат.

Для первинної верифікації роботи приладу було проведено тестування запропонованого авторами способу подавлення завад з використанням двох сенсорів. Результати зображено на рис. 4.7.

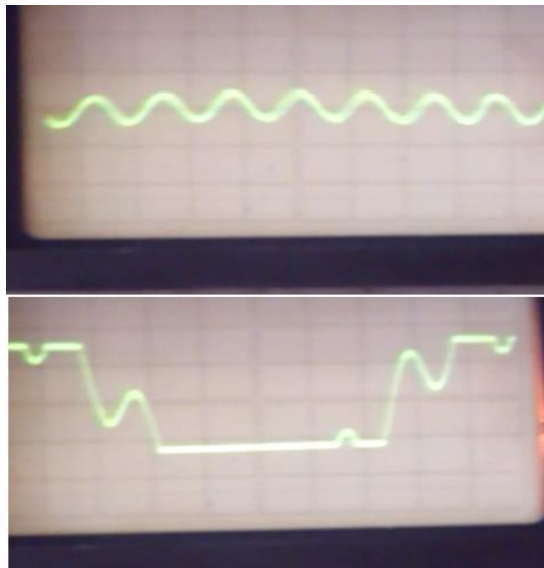


Рисунок 4.7 – Осцилограма сигналу з двома та відповідно з одним сенсорами

При проведенні досліджень макет виявився працездатним. Амплітуда сигналу була пропорційна зміні потенціалів. А зміна фази вказувала на зміну напрямку градієнту електричного поля. Даний результат можна повторити, сигнал є прогнозованим.

Було побудовано амплітудно-частотну характеристику сенсора, рис. 4.8, та зроблено висновок що отримані сенсори перевершують заявлені параметри. Експериментально підтверджено, що верхня полоса частоти пропускання сигналу лежить в межах 20кГц.

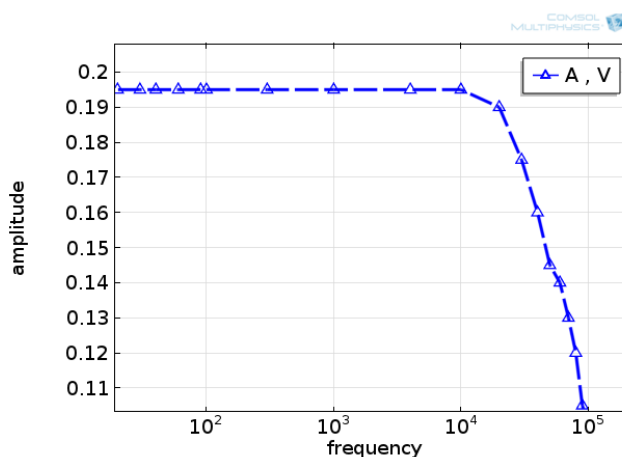


Рисунок 4.8 – Амплітудно-частотна характеристика сенсора

Таким чином установка може застосовуватися для контролю дефектів у діелектричних зразках з високим ступенем достовірності, зокрема при виготовленні полімерних композиційних матеріалів з детермінованими властивостями.

В результаті дослідження створено експериментальну установку для реалізації електроємнісного методу неруйнівного контролю для визначення наявності дефектів у полімерних композиційних матеріалах, розроблено метод проведення контролю, що забезпечує найкраще знаходження дефектів, проведення експериментальні дослідження та здійснено обробку результатів та їх верифікацію.

4.2 Аналіз впливу електромагнітних завад на результати вимірювання сигналу

Чутливість до вимірювання зміни ємності розглянутої вище схеми тим вища, чим більший вхідний опір вимірюючого підсилювача.

Проте, внаслідок підвищення вхідного опору схема стає дуже чутливою до навколишніх мережевих завад частотою 50 Гц в приміщеннях з електропроводкою. Наприклад, при зазначених вище значеннях параметрів вимірюючого підсилювача ($R_{\text{вх}} = 100 \text{ МОм}$) навіть невелика паразитна ємність між входом вимірюючого підсилювача та шинами мережевого живлення (рис. 1) може призвести до суттєвих завад (рис. 4.9).

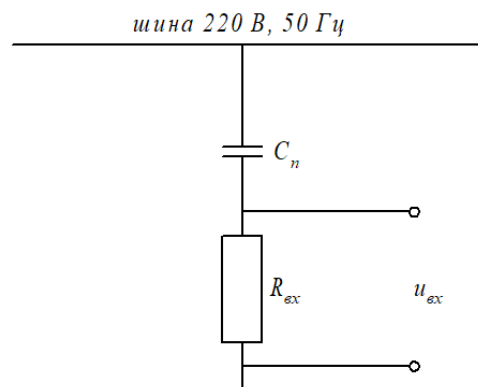


Рисунок 4.9 – Схема впливу електромагнітних завад

Паразитна ємність між входом вимірюючого підсилювача та шинами мережевого живлення

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{d}{a} + \sqrt{\frac{d^2}{a^2} - 1}\right)} = 0.012 \text{ пФ}$$

де ϵ – діелектрична проникність повітря, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$;

l – довжина провідника, $l = 2$ мм;

d – відстань від шини мережевого живлення, $d = 2$ м;

a – радіус провідника, $a = 0,25$ мм.

Модуль напруги $u_{\text{вх}}$ можливо визначити наступним чином

$$u_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{мережі}} R_{\text{вх}}}{z_{\text{сн}} + R_{\text{вх}}} = 83 \text{ мВ}$$

$$\text{де } z_{\text{сн}} = \frac{1}{2\pi f \cdot C_n} = 2.65 \cdot 10^{11} \text{ Ом.}$$

Як показує практика паразитні ємності ще більші, в цьому можна пересвідчитись при підключенні щупа до входу звичайного осцилографа з вхідним опором 1 МОм.

Це явище є недопустимим, так як сигнал перешкоди перевищує корисний сигнал та унеможливорює подібні вимірювання. Для зменшення його впливу в лабораторних умовах необхідно використовувати спеціальні екрановані приміщення та заходи.

Для заглушення завади мережі з частотою 50 Гц можна використовувати фільтри верхніх частот. Але, якщо врахувати, що робочий діапазон частот знаходиться в діапазоні 2 кГц, то для подавлення завади мережі хоча б на 60 дБ при заданій частоті зрізу фільтра 2 кГц необхідно використання фільтра вище, ніж 3-го порядку. Реалізація активного фільтра на такій частоті з такими

характеристиками викликає певні складності, а реалізація пасивного фільтра взагалі неможлива.

4.3 Реалізація підвищення завадостійкості сенсорів

Головним недоліком електроємнісного методу НК є низька завадостійкість до електромагнітних завад, що потребує додаткових заходів для їх усунення. Такими заходами зазвичай є введення у електричну схему приладу додаткових частотних фільтрів, та обладнання самого пристрою електромагнітним екраном, який може погіршити характеристики вимірювального каскаду приладу, так як створює додаткову ємність в електричній схемі.

Чутливість перетворювачів до електромагнітних завад спричинено тим, що вони мають плоску форму у вигляді електропровідної (зазвичай мідної) пластини, і по суті, є «антенною» для електромагнітних хвиль широкого спектру частот [92]. Це можуть бути хвилі радіостанцій, бездротових протоколів передачі інформації, хвилі, породженні електронними пристроями, статичними розрядами, а також електромережою. Всі ці завади спричиняють індукцію додаткового заряду на вимірювальних пластинах перетворювачів, що зменшує достовірність контролю дефектів.

На даний момент існують 2 основних метода боротьби з електромагнітними завадами:

- екранування;
- частотна фільтрація.

Метод екранування зазвичай використовується в радіотехніці для ослаблення впливу електромагнітних хвиль на електронні компоненти схеми [137]. Згідно із рекомендаціями до методу, товщина стінок екрану повинна бути співмірна з довжиною хвилі у цьому матеріалі. Тому для низьких частот даний метод є вкрай неефективним, так як товщина стінок цього екрану складатиме

декілька сантиметрів для ефективного екранування. Так як у нашому випадку йде мова саме про невисокі частоти, то даний метод є малоефективним для вирішення нашої задачі.

Більш ефективним у даному випадку є метод частотної фільтрації. На даний момент існує величезний спектр принципових схем частотних фільтрів різного типу (полосові, низьких, високих частот, режекторні) та спеціальних засобів частотної фільтрації (напр. цифрові фільтри).

Складність застосування методу частотної фільтрації полягає у побудові фільтра з хорошими пропускними характеристиками (нахил кривої зрізу частоти, пульсації на частоті зрізу) та лінійністю полоси пропускання. У деяких випадках, коли використовуються сигнали на частотах, що наближені до частот електромагнітних завад, схема такого фільтра, який би міг знешкодити ці завади без спотворення інформативного сигналу, являє собою чи не найбільшу проблему під час проектування всього пристрою, і часто стає причиною відмови від його виготовлення.

У даному дослідженні йде мова про використання інформативного сигналу на частотах, в діапазоні від 100 Гц. Тому доцільним є пошук альтернативного способу пригнічення впливу шкідливих завад, що дав би змогу значно спростити проектування даної системи.

В запропонованому методі для пригнічення сигналів завад які знаходяться на значній відстані від вимірювальних електродів використовують два вимірювальних електроди замість одного. Завади з частотою 50 Гц, та навіть до 10 кГц, відповідно довжина хвилі для яких знаходиться в діапазоні від 30 км і вище, при невеликій різниці відстані між електродами будуть індукувати заряди в обох електродах з однаковою фазою та амплітудою. Значення величин зарядів, що індукують в двох вимірювальних електродах електричного поля від дефекту буде різним, і ця різниця буде пропорційною розміру дефекту. Тому при передачі цих сигналів до диференційного підсилювача завада буде компенсована.

З цих міркувань було розроблено інформаційну модель [138-149] завадостійкої системи електроємнісного контролю, структурну схему якої наведено на рис. 4.8.

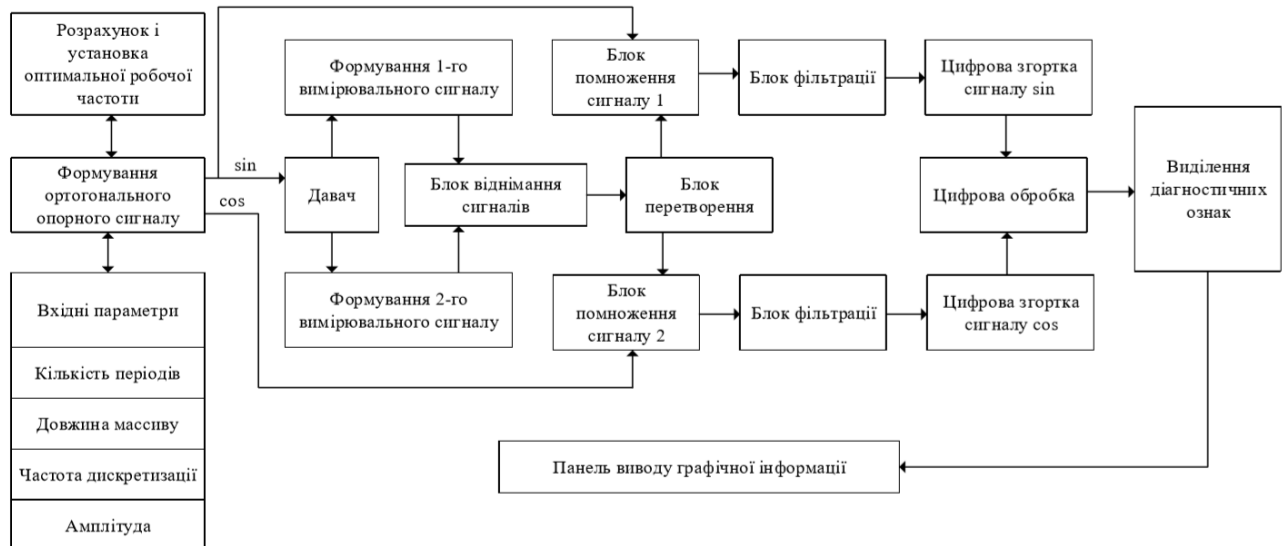


Рисунок 4.10 – Інформаційна модель завадостійкої системи електроємнісного контролю

Логіка роботи зображеної на рис. 4.10 інформаційної моделі завадостійкої системи електроємнісного контролю наступна. Після розрахунку оптимальної робочої частоти, за розробленою у п. 2.6 методикою, формується ортогональний опорний сигнал з урахуванням вхідних параметрів: кількість періодів, довжина масиву, частота дискретизації, амплітуда. Сигнал подається на давач, за допомогою якого здійснюється вплив на ОК і на виходах з давача отримується два інформаційних сигнала, параметри яких будуть залежати від місцезнаходження та розмірів дефекту і не будуть залежати від рівня завад та їх місцезнаходження. Таким чином, при відніманні сформованих вищезазначених вимірювальних сигналів відбувається повна компенсація завад. При цьому, інформація про положення та розмір дефекту не спотворюється. Після чого визначається інформація про проекції вимірювального сигналу на ортогональні вісі опорного сигналу, для цього відбувається перемноження цих сигналів

відповідно з опорними сигналами \sin та \cos . На виході помножувача отримується постійна складова, що пропорційна сигналам \sin та \cos , та складова з подвоєною частотою, яка відфільтровується за допомогою блоків фільтрації. Отримані постійні складові кодуються та подаються на блок цифрової обробки, де розраховується амплітуда та фаза вимірювального сигналу. Блок виділення діагностичних ознак відповідає за розрахунок діелектричної проникності в точці, глибини залягання та розмірів дефекту.

На базі розробленої інформаційної моделі створено та запатентовано [138] функціональну схему системи для контролю електроємнісим методом зі способом компенсації електромагнітних завад низької частоти. Функціональна схема зображена на рис. 4.11.

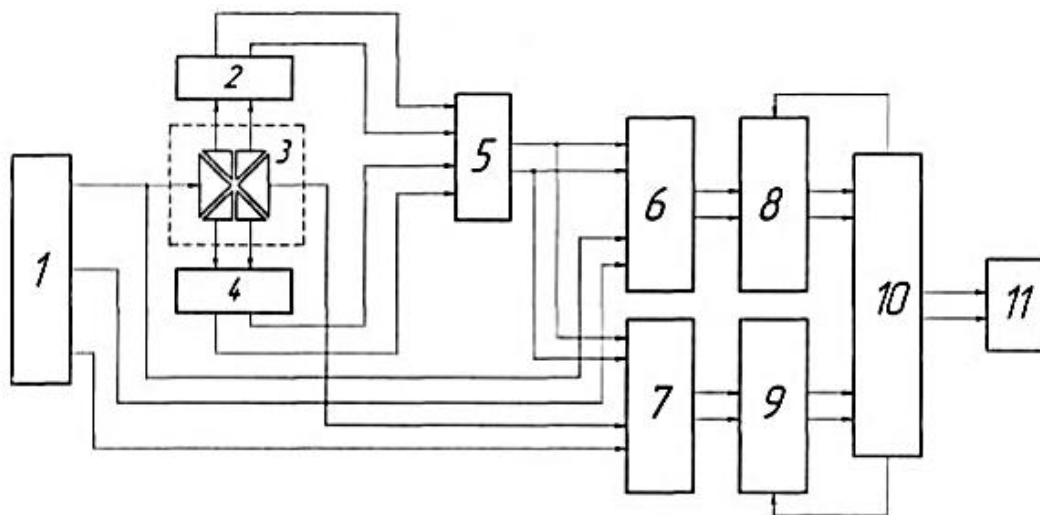


Рисунок 4.11 – Функціональна схема завадостійкої системи електроємнісного амплітудно-фазового способу контролю

Функціональна схема, що реалізує спосіб, містить генератор опорних ортогональних сигналів 1, одні виходи якого підключено до однієї пари випромінюючих електродів датчика 3, а також до входу опорного сигналу синхронного детектора 6, а другі виходи підключені до входу опорного сигналу синхронного детектора 7. Першу пару приймаючих електродів датчика 3 підключено до підсилювача заряду 2, другу пару приймаючих електродів

датчика 3 підключено до підсилювача заряду 4, причому підсилювачі зарядів 2 та 4 підключено до диференційного підсилювача 5. Вихід диференційного підсилювача 5 підключено до других входів (підключених паралельно) вимірювального сигналу синхронних детекторів 6 та 7, виходи яких підключено до аналогових входів аналого-цифрових перетворювачів 8 та 9 відповідно, цифрові виходи яких підключені до блока керування та збору інформації 10, вихід якого підключено до входу комп'ютера 11, причому входи запуску аналого-цифрових перетворювачів 8 та 9 підключені також до блока керування та збору інформації 10.

З генератора опорних ортогональних сигналів 1 на пару випромінюючих електродів датчика 3 та на входи опорного сигналу синхронного детектора 6 подається опорний сигнал $U_{оп1} = A_0 \cdot \cos(\omega t)$, а на входи опорного сигналу синхронного детектора 7 опорний сигнал $U_{оп2} = A_0 \cdot \sin(\omega t)$. Індукований заряд реєструється за допомогою двох пар приймаючих електродів датчика 3 шляхом підключення їх до підсилювачів заряду 2 та 4. Вихідні сигнали цих підсилювачів подаються на входи диференційного підсилювача 5, на виході якого отримують вимірювальний сигнал $U_{вим} = A_{вим} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$, що дорівнює різниці сигналів з виходів підсилювачів 2 та 4. Отриманий вимірювальний сигнал $U_{вим} = A_{вим} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ подається одночасно на вимірювальні входи синхронних детекторів 6 та 7. Отримані на виходах синхронних детекторів 6 та 7 постійні складові сигналів U_{cos} , U_{sin} подаються на входи аналого-цифрових перетворювачів 8 та 9 відповідно, і будуть пропорційні проекціям вимірювального сигналу на осі X та Y умовної системи координат:

$$U_{cos} = U_{оп1} \cdot U_{вим} = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot A_{вим} \cdot (\sin(2\omega t + \varphi) - \sin\varphi),$$

$$U_{sin} = U_{оп2} \cdot U_{вим} = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot A_{вим} \cdot (\sin(2\omega t + \varphi) - \sin\varphi)$$

Отриманий код результатів вимірювання з виходів аналого-цифрових перетворювачів 8 та 9 подається до входів блока керування та обробки інформації 10, за допомогою якого здійснюється запуск аналого-цифрових

перетворювачів 8 та 9, а також відбувається подальше обчислення значення фази та амплітуди напруженості поля згідно відповідних виразів:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_{\cos}}{U_{\sin}} = \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi}, \quad U_{\Sigma \text{вих}} = \sqrt{U_{\cos}^2 + U_{\sin}^2}.$$

Запропонований електроємнісний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю з використанням ортогональних опорних сигналів та цифровою обробкою сигналів, дозволяє реєструвати з великою точністю зміну не тільки фазового зсуву вимірювального сигналу (який при ортогональній обробці, як відомо, не буде залежати від зміни амплітуди вимірювального сигналу), але і зміну амплітуди вимірювального сигналу. Підвищення точності вимірювання досягається також внаслідок підвищення завадостійкості даного методу наступним чином. Значення величини заряду, що індукується в двох приймаючих електродах датчика 3, від електричного поля дефекту буде різним, і ця різниця буде пропорційною розміру дефекту, тобто градієнту поля дефекту (якщо дефект не знаходиться посередині відстані між парами приймаючих електродів). Джерело завади знаходиться на значній відстані від двох пар приймаючих електродів датчика 3, тому невелика різниця відстані між електродами не впливає на амплітуду та фазу індукованого заряду від цього джерела завади в обох парах приймаючих електродів датчика 3. Тому величина складової сигналу, що отримують від джерела завади на виході підсилювачів 2 та 4, буде однаковою, що приведе до її компенсації на виході диференційного підсилювача 5. Використання запропонованого способу неруйнівного контролю дає можливість здійснювати контроль виробів в звичайних лабораторних умовах без використання спеціальних приміщень, а також спеціальних засобів екранування.

Враховуючи недолік запропонованого способу, а саме потреба у двох каналах вимірювання та необхідність в використанні двох аналого-цифрових

перетворювачів, на його базі був розроблений одноканальний амплітудно-фазовий спосіб контролю, схему якого наведено на рис. 4.12 [139].

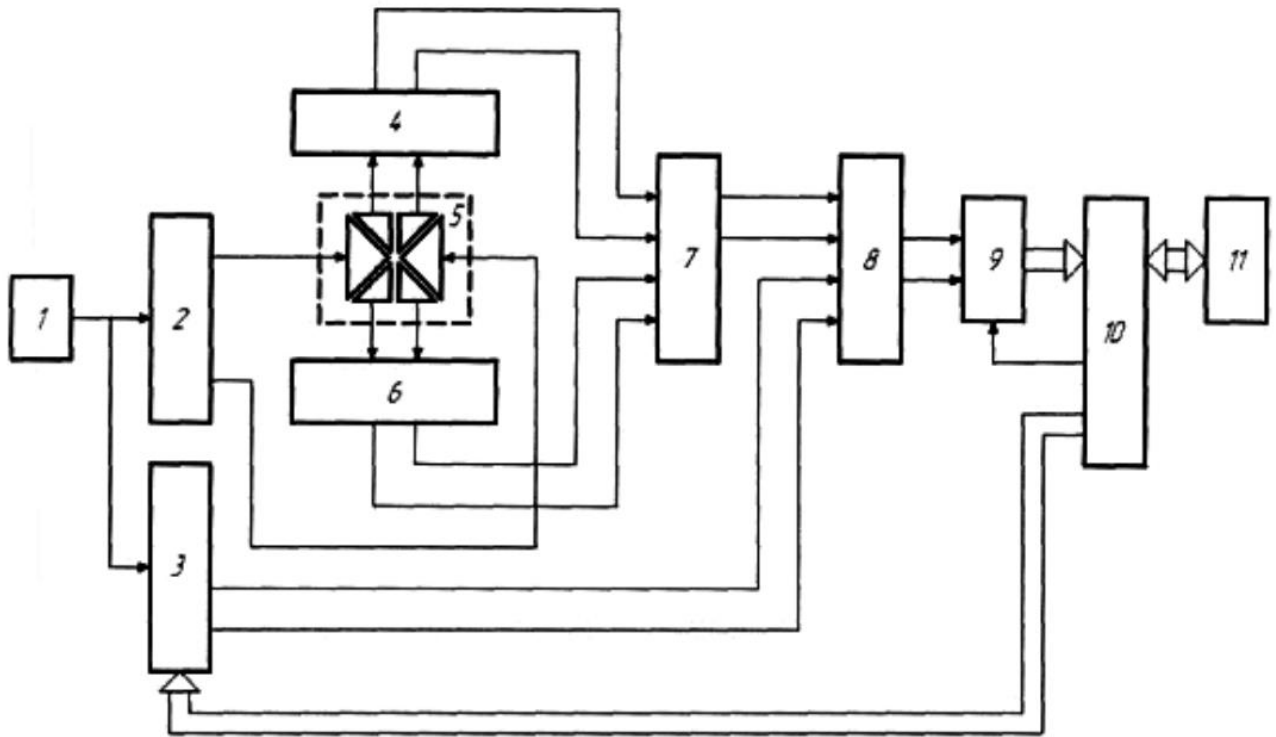


Рисунок 4.12 – Функціональна схема завадостійкої одноканальної системи електроємнісного амплітудно-фазового способу контролю

Функціональна схема, що реалізує спосіб, містить генератор синхроімпульсів 1, який підключено до синхровходів генератора вхідних сигналів (синтезатора) 2 і генератора опорних сигналів (синтезатора) 3. Виходи генератора вхідних сигналів підключено до пари збуджуючих електродів датчика 5, а виходи генератора опорних сигналів підключено до опорних входів синхронного детектора 8. Першу пару вимірювальних електродів датчика 5 підключено до підсилювача заряду 4, другу пару вимірювальних електродів датчика 5 підключено до підсилювача заряду 6, причому підсилювачі зарядів 4 та 6 підключено до диференційного підсилювача 7. Вихід диференційного підсилювача 7 підключено до других входів вимірювального сигналу синхронного детектора 8, виходи якого підключено до аналогового входу

аналого-цифрового перетворювача 9, цифрові виходи яких підключені до інформаційних входів блока керування та збору інформації 10, виходи якого підключено до входу комп'ютера 11, причому вхід запуску аналого-цифрового перетворювача 9 і входи управління генератора опорних сигналів (синтезатора) 3 підключені також до блока керування та збору інформації 10.

4.4 Оцінка впливу похибок

4.4.1 Методика розрахунку похибок прямих вимірювань

Визначення похибки результату вимірювань (як прямих, так і непрямих) фізичних величин здійснюється за методикою, наведеною в праці [150].

Так, похибку результату прямих вимірювань фізичних величин під час багаторазових спостережень виконується в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку результату одного вимірювань фізичної величини за умови статистичної незалежності складових визначають за залежністю

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2}, \quad (4.1)$$

де $\sigma_{\text{пвп}}$, $\sigma_{\text{пр}}$, $\sigma_{\text{окр}}$ – похибки первинного вимірювального перетворювача, приладу та округлення, відповідно:

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3}, \quad (4.2)$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right), \quad (4.3)$$

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}}. \quad (4.4)$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка приладу;

γ_o – клас точності приладу;

$D_{\text{вим}}$ – діапазон вимірювання приладу;

C – ціна поділки шкали (дискрет цифрового відліку) приладу.

Випадкова помилка середнього результату становить

$$\theta(\bar{x}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (4.5)$$

де x_i – i -й результат вимірювання;

ξ – коефіцієнт Стюдента, який залежить від довірчої імовірності P_d і кількості вимірювань n .

Повна похибка прямого вимірювання фізичної величини обчислюється за формулою

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{дип}}^2(\bar{x}) + \theta^2(\bar{x})}, \quad (4.6)$$

а інтервальна оцінка фізичної величини становитиме

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x}). \quad (4.7)$$

4.4.2 Розрахунок похибки вимірювання напруги

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (4.2) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{1}{3} = \pm 0,33 \text{ мВ},$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка перетворювача:

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 1 \text{ мВ}.$$

Похибка приладу, використаного в дослідях, згідно з (4.3) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{3}{100} \cdot (100 - 1) \right) = 0,99 \text{ мВ},$$

Похибка округлення згідно з (4.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,29 \text{ мВ}.$$

Значення дослідно-інструментальної похибки визначаємо згідно з (4.1):

$$\sigma_{\text{дп}}(\bar{V}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,33^2 + 0,99^2 + 0,29^2} = 1,08 \text{ мВ}.$$

Тепер визначимо величину випадкової похибки середнього результату вимірювання напруги. Для визначення випадкової похибки проводили п'ять послідовних вимірювань значень величини напруги, які становили 50; 50; 51; 51; 50 мВ.

Середнє арифметичне напруги становить

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{5} (50 + 50 + 51 + 51 + 50) = 50,4 \text{ мВ}.$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned} \theta(\bar{V}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{V} - V_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} \left[(50,4 - 50)^2 + (50,4 - 50)^2 + (50,4 - 51)^2 + (50,4 - 51)^2 + (50,4 - 50)^2 \right]} = \\ &= 0,64 \text{ мВ}, \end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$ [150].

Повна похибка прямого вимірювання напруги (4.6)

$$\sigma(\bar{V}) = \sqrt{1,08^2 + 0,64^2} = 1,26 \text{ мВ.}$$

Значення напруги відповідно до (4.7) становить

$$V = \bar{V} \pm \sigma(\bar{V}) = \bar{V} \pm 1,26 \text{ мВ.}$$

4.4.3 Розрахунок похибки вимірювання фази

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (4.2) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{0,1}{3} = \pm 0,03^\circ,$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка перетворювача:

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 0,1^\circ.$$

Похибка приладу згідно з (4.3) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,2}{100} \cdot (360 - 0) \right) = 0,24^\circ.$$

Похибка округлення згідно з (4.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,029^\circ.$$

Значення дослідно-інструментальної похибки визначаємо згідно з (4.1):

$$\sigma_{\text{дпп}}(\bar{\varphi}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,03^2 + 0,24^2 + 0,029^2} = 0,24^\circ.$$

Тепер визначимо величину випадкової похибки середнього результату

вимірювання фазового зсуву. Для визначення випадкової похибки проводили п'ять вимірювань значень величини фазового зсуву, які становили 30° ; 29° ; 29° ; 30° ; 30° .

Середнє арифметичне фазового зсуву становить

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i = \frac{1}{5} (30 + 29 + 29 + 30 + 30) = 29,6^\circ.$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned} \theta(\bar{\varphi}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{\varphi} - \varphi_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(29,6 - 30)^2 + (29,6 - 29)^2 + (29,6 - 29)^2 + (29,6 - 30)^2 + (29,6 - 30)^2]} = \\ &= 0,64^\circ, \end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$ [150].

Повна похибка прямого вимірювання фази (4.6)

$$\sigma(\bar{\varphi}) = \sqrt{0,24^2 + 0,64^2} = 0,68^\circ.$$

Значення фазового зсуву відповідно до (4.7) становить

$$\varphi = \bar{\varphi} \pm \sigma(\bar{\varphi}) = \bar{\varphi} \pm 0,68^\circ.$$

4.5 Розрахунок похибки вимірювальної схеми

З метою визначення випадкової похибки при вимірюванні розробленою схемою здійснено числове моделювання у програмному комплексі MathWorks MATLAB.

Здійснено моделювання впливу таких параметрів:

- співвідношення сигнал-шум (SNR) в діапазоні 0-40 дБ;
- розрядність АЦП в діапазоні від 6 до 24 розрядів;
- частота дискретизацій в діапазоні від 0,1 до 10 Мвиб/с.

Програмний код моделі наведено у Додатках.

В ході числового моделювання здійснювався розрахунок випадкової похибки при вимірюванні розробленою схемою в діапазоні значень початкового фазового зсуву від 0° до 90° .

На рис. 4.13 зображено залежність похибки вимірювання амплітуди сигналу від співвідношення величини сигнал-шум при різних значеннях початкового фазового зсуву за розрядності АЦП $n=12$ та частоті дискретизації 1 Мвиб/с.

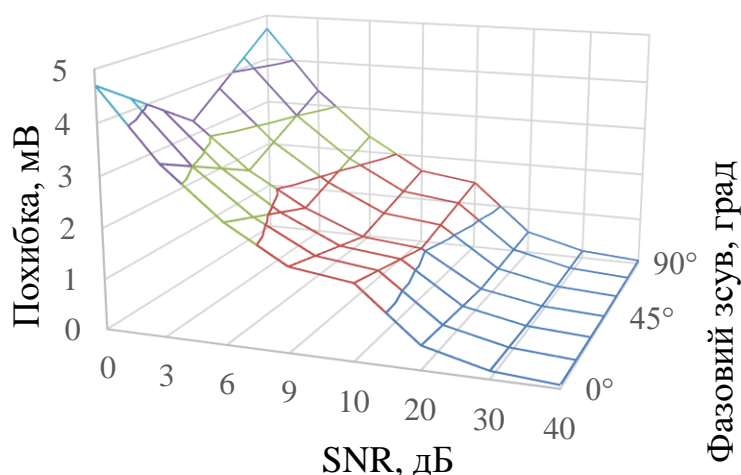


Рисунок 4.13 – Залежність похибки вимірювання амплітуди сигналу від SNR за різних значень фазового зсуву

Як видно з рис. 4.13 похибка мінімальна за фазового зсуву 45° . Вимірювання амплітуди з адекватною похибкою можливе при значенні $\text{SNR} > 10$ дБ.

На рис. 4.14 зображено залежність похибки вимірювання фазового зсуву сигналу від співвідношення сигнал-шум при різних значеннях початкового фазового зсуву за розрядності АЦП $n=12$ та частоті дискретизації 1 Мвиб/с.

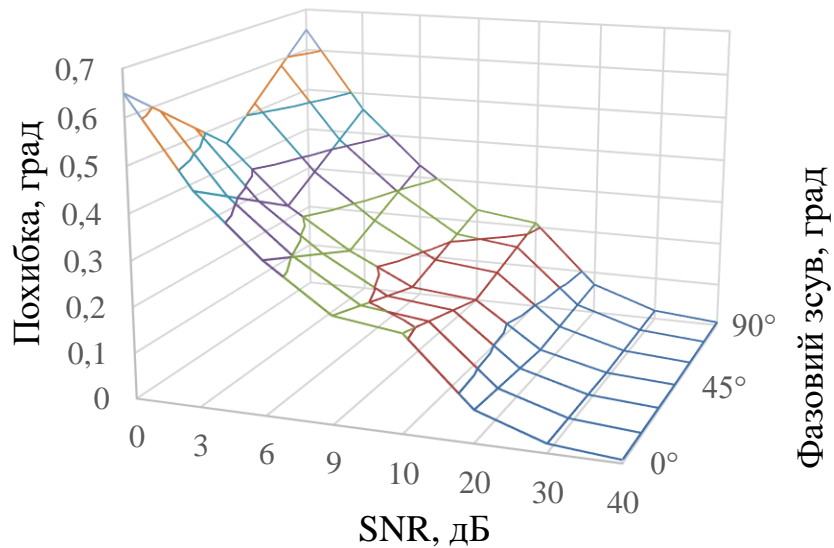


Рисунок 4.14 – Залежність похибки вимірювання фазового зсуву сигналу від SNR при різних значеннях початкового фазового зсуву

Як видно з рис. 4.14 похибка мінімальна за початкового фазового зсуву 45° . Вимірювання амплітуди з адекватною похибкою можливе при значенні $\text{SNR} > 10$ дБ.

На рис. 4.15 зображено залежність похибки вимірювання амплітуди сигналу від розрядності АЦП при різних значеннях початкового фазового зсуву за значення $\text{SNR} = 10$ дБ та частоті дискретизації 1 Мвиб/с.

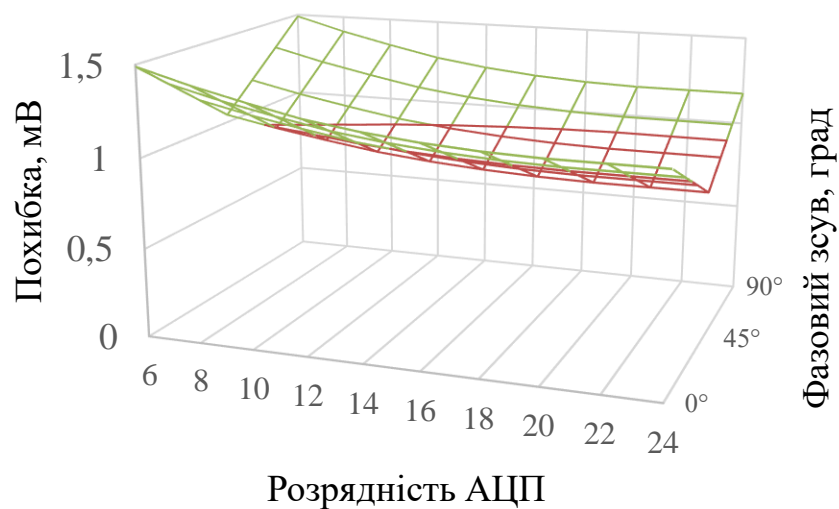


Рисунок 4.15 – Залежність похибки вимірювання амплітуди сигналу від розрядності АЦП при різних значеннях початкового фазового зсуву

Як видно з рис. 4.15 при розрядності АЦП більше 8 вплив фазового зсуву набагато більше, ніж розрядність. В зв'язку з цим доцільно використовувати 8-розрядні АЦП.

На рис. 4.16 зображено залежність похибки вимірювання фазового зсуву сигналу від розрядності АЦП при різних значеннях початкового фазового зсуву за значення $SNR = 10$ дБ та частоті дискретизації 1 Мвиб/с.

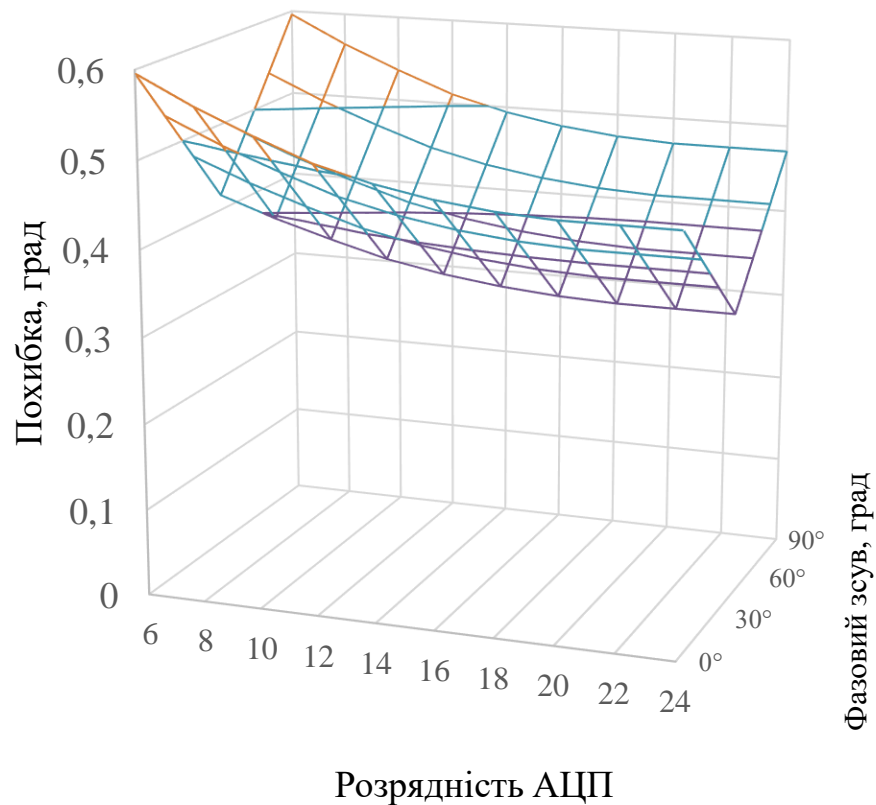


Рисунок 4.16 – Залежність похибки вимірювання фазового зсуву сигналу від розрядності АЦП при різних значеннях початкового фазового зсуву

Як видно з рис. 4.16 при розрядності АЦП більше 8 вплив початкового фазового зсуву набагато більше, ніж розрядність. В зв'язку з цим доцільно використовувати 8-розрядні АЦП.

На рис. 4.17 зображено залежність похибки вимірювання амплітуди сигналу від частоти дискретизації при різних значеннях початкового фазового зсуву за значення $SNR = 10$ дБ та 8-розрядному АЦП.

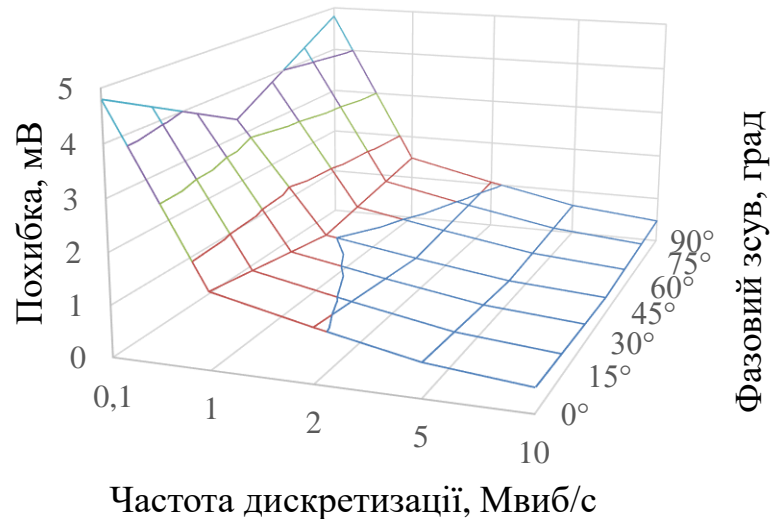


Рисунок 4.17 – Залежність похибки вимірювання амплітуди сигналу від частоти дискретизації при різних значеннях початкового фазового зсуву

Як видно з рис. 4.17 при збільшенні частоти дискретизації похибка лінійно зменшується, після досягнення частоти 1 Мвиб/с її вплив зменшується, проте похибка зменшується. В зв'язку з цим доцільно використовувати частоту дискретизації не менше, ніж 1 Мвиб/с.

На рис. 4.18 зображено залежність похибки вимірювання фазового зсуву сигналу від частоти дискретизації при різних значеннях початкового фазового зсуву за значення $SNR = 10$ дБ та 8-розрядному АЦП.

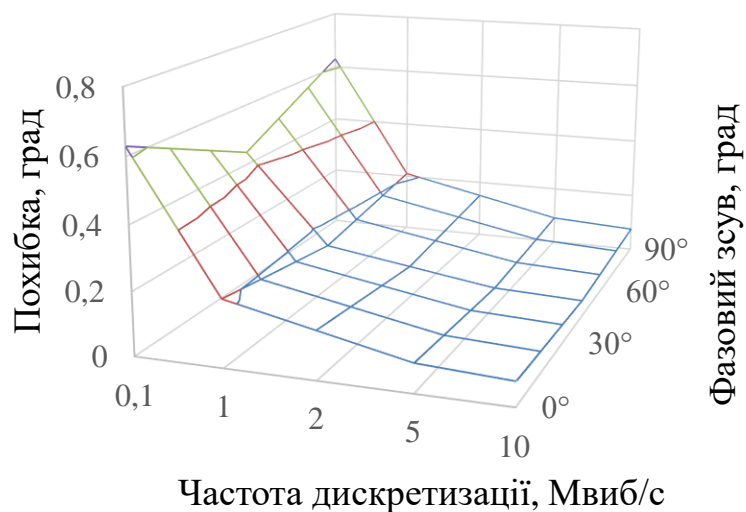


Рисунок 4.18 – Залежність похибки вимірювання фазового зсуву сигналу від частоти дискретизації при різних значеннях початкового фазового зсуву

Як видно з рис. 4.18 при збільшенні частоти дискретизації похибка лінійно зменшується, після досягнення частоти 1 Мвиб/с її вплив зменшується, проте похибка зменшується. В зв'язку з цим доцільно використовувати частоту дискретизації не менше, ніж 1 Мвиб/с.

Проте, в реальному обладнанні частота дискретизації обмежена 4 Мвиб/с в зв'язку з обмеженням довжини масиву в обладнанні.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі отримано наступні результати:

1. Розроблено спосіб підвищення завадостійкості, що дозволяє реєструвати з високою точністю зміну не тільки фазового зсуву вимірювального сигналу, але і зміну амплітуди вимірювального сигналу, що забезпечує підвищення точності вимірювання. На розроблений спосіб отримано патенти України на винахід.

2. Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили працездатність методу для розв'язання задач дефектоскопії. Розраховано похибку вимірювання амплітуди та фази сигналу, що є прийнятними для контролю.

3. Визначено апаратурну похибку, та здійснено моделювання у програмному комплексі MATLAB з метою визначення випадкової похибки при вимірюванні розробленою схемою. Зокрема встановлено, що похибка набуває найменших значень за початкового фазового зсуву сигналів 45° , при цьому доцільно використовувати 8-розрядні АЦП з частотою дискретизації не менше, ніж 1 Мвиб/с.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі в результаті проведення теоретичних і експериментальних досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу удосконалення електроємнісного методу неруйнівного контролю матеріалів за рахунок підвищення його чутливості та швидкодії. Найбільш значимими науковими та практичними результатами роботи є такі.

1. Встановлено, що електроємнісний метод неруйнівного контролю може бути застосований при виробництві виробів з НМІПКМ. Відзначено, що даний час швидкодія методу не дозволяє здійснювати локальний контроль в реальному часі через низьку швидкість існуючих засобів вимірювання. Крім того, для цього методу не існує аналітичних способів знаходження ємності для сенсорів складної форми.

2. Здійснено математичне моделювання, в результаті якого визначено раціональні параметри та режими роботи сенсора для забезпечення максимальної чутливості вимірювальної схеми. Зокрема, отримані вирази для визначення оптимальних робочих частот для застосування електроємнісного методу та запропоновано методику визначення цих частот при зміні параметрів схеми.

3. Розроблено математичну модель процесу електроємнісного контролю дефектів у виробах на основі рівнянь Максвелла-Ампера, що дозволило дослідити параметри процесу контролю та межі застосування методу для провідних та непровідних зразків, зокрема: товщина об'єкту контролю, робочий зазор, діелектрична проникність. Здійснено моделювання контролю дефектів різних типів.

4. Розроблено новий підхід до визначення оптимальної геометричної форми та розмірів сенсора за рахунок математичного моделювання розподілу параметрів електричного поля сенсора у просторі. Здійснено моделювання розподілу чутливості ємнісного сенсора, що дозволило порівняти сенсори

різної геометричної форми та визначити оптимальні конструктивні параметри. Запропоновано конструкцію сенсора, яка має найвищу чутливість та глибину проникнення, що дозволило збільшити глибину проникнення на 50%, а чутливість на 63%.

5. Здійснено моделювання процесу контролю матеріалів зі змінними провідними властивостями, НМІПКМ, що підтвердило можливість застосування методу для такого класу матеріалів при контролі діелектричної проникності у локальній точці з високою швидкістю.

6. Розроблено інформаційну модель завадостійкої системи електроємнісного контролю, яка дає можливість одночасно реєструвати зміну фазового зсуву та амплітуди вимірювального сигналу. Запропоновані завадостійкі структури систем контролю з підвищеною чутливістю сенсору та швидкодією. На розроблені структури отримано патенти України на винахід.

7. Створено лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень, розроблено методiku та проведено дослідження, які підтвердили працездатність електроємнісного методу для контролю дефектів.

8. Проаналізовано вплив різних чинників на випадкову похибку вимірювання, що дало змогу встановити оптимальні параметри схеми. Зокрема встановлено, що доцільно використовувати 8-розрядні АЦП з частотою дискретизації не менше, ніж 1 Мвиб/с.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також в дослідницьку та виробничу діяльність ТОВ «ДП-Тест» (м. Київ).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы / Юрий Анатольевич Михайлин. — СПб: Научные основы и технологии, 2008. — 660 с.
2. Wallace, G. G. Intelligent polymer systems-concepts, approaches present uses and potential applications / G. G. Wallace // Material Forum. — 1992. — Vol. 16, № 2. — P. 111–115.
3. Carpi, F. Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators / F. Carpi, E. Smela. — Chichester: Wiley, 2009. — 496 p.
4. Hoffman, A. S. «Intelligent» polymers in medicine and biotechnology / A. S. Hoffman // Macromolecular Symposia. — 1995. — Vol. 98, № 1. — P. 645–664.
5. Honeychurch, K. C. Nanosensors for Chemical and Biological Applications / K. C. Honeychurch. — Birmingham: Woodhead Publishing, 2014. — 372 p.
6. Лихачев, А. Н. Особенности создания «интеллектуальных» конструкций формо- и размеростабильных систем космических аппаратов на основе диэлектрических полимерных материалов / А. Н. Лихачев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2013. — № 1 (47). — С. 114–118.
7. Сівецький В.І., Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Куриленко В.М. Перспективи створення й використання інтелектуальних виробів із наномодифікованих полімерних композитів. Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2017. №1(16). С. 7—14.
8. Сівецький В.І., Сокольський О.Л., Івіцький І.І. [та ін.] Методи та пристрої для виготовлення виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів. Вісник НТУ «ХПІ». Механіко-технологічні системи та комплекси. 2016. №4(1176). С. 95—101.
9. Колосов О.Є., Сівецький В.І., Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Куриленко В.М. Матеріали та технології для одержання функціональних

полімерних композиційних матеріалів. Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". 2017. №58. С. 184—192.

10. Методы неразрушающего контроля. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий: Электронное учебное пособие / [Н. В. Кашубский, А. А. Сельский, А. Ю. Смолин и др.]. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 108 с.

11. Shull P. J. Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications / P. J. Shull. – London: CRC Press, 2016. – 876 с.

12. Шарп Р. Методы неразрушающих испытаний / Р. Шарп. – М.: Мир, 1972. – 494 с.

13. Mechanical and barrier properties of epoxy resin filled with multi-walled carbon nanotubes [Text] / [L. Guadagno, L. Vertuccio, A. Sorrentino et al.] // Journal of Carbon. – 2009. – N 47. – P. 2419–2430.

14. Structure-property relationships on uniaxially oriented carbon nanotube/polyethylene composites [Text] / [G. Giuliana, D. Roberta, G. Lieto et al.] // Journal of Polymer. – 2011. – N 52. – P. 1124–1132.

15. Report to the President and Congress on the Fifth Assessment of the National Nanotechnology Initiative / Executive Office of the President President's Council of Advisors on Science and Technology. — October 2015. — 88 p.

16. Procedure for analysis of ultrasonic cavitator with radiative plate [Text] / A. E. Kolosov, V. I. Sivetskii, E. P. Kolosova, E. A. Lugovskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – Vol. 48. – P. 662–672.

17. Method of selecting efficient design and operating parameters for equipment used for the ultrasonic modification of liquid-polymer composites and fibrous fillers / [A. E. Kolosov, A. S. Sakharov, V. I. Sivetskii et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2012. – Vol. 48. – Issue 7. – P. 459–466.

18. Nanocs Carbon Nanotubes [Електронний ресурс] // Nanocs. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nanocs.com/nanotube.htm>.

19. Irving P. E. *Polymer Composites in the Aerospace Industry* / P. E. Irving, C. Soutis. – Cambridge: Elsevier, 2015. – 536 с.
20. Ключев В. В. Приборы для неразрушающего контроля качества материалов и изделий. Справочник / В. В. Ключев. – М.: Машиностроение, 1976. – 488 с.
21. Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль / И. П. Белокур. – Киев: Вища школа, 1990. – 207 с.
22. Белокур И. П. Дефектоскопия материалов и изделий / И. П. Белокур, В. А. Коваленко. – Киев: Техника, 1989. – 192 с.
23. Ключев В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник / В. В. Ключев. – Москва: Машиностроение, 1986. – 351 с.
24. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В. В. Ключев. – М.: Машиностроение, 1995. – 656 с.
25. Venkatasubramanian T. V. An ac potential drop method for monitoring crack length / T. V. Venkatasubramanian, B. A. Unvalaf // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. – 1984. – №17. – P. 765–771.
26. Sjogren B. Test of electromagnetic, non-destructive method for determining material properties in steel / B. Sjogren, A. Nilsson, A. Rensgard // *La Metallurgia Italiana*. – 2014. – N10. – P. 23–27.
27. Jiles D. C. Review of magnetic methods for nondestructive evaluation / D. C. Jiles // *NDT International*. – 1998. – №21. – P. 311–319.
28. Prance R. Depth profiling of defects in stainless steel using electric potential sensors and a non-contact AC potential drop method / R. Prance, W. Gebrial, C. Antrobus // *Insight*. – 2008. – Vol. 50. – P. 95–97.
29. Ghajar R. An alternative method for crack interaction in NDE of multiple cracks by means of potential drop technique / R. Ghajar // *NDT & E International*. – 2004. – Vol. 37. – P. 539–544.
30. Haugland S. Fundamental studies of the remote-field eddy-current effect / S. Haugland // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1996. – №32. – C. 3195–3211.

31. Dodd C. V. Optimizing Defect Detection in Eddy Current Testing / C. V. Dodd, A. O. Deeds, W. I. Spoeri // *Materials Evaluation*. – 1971. – №3. – P. 59–83.

32. Герасимов В. Г. Вопросы общей теории и применения метода вихревых токов для контроля многослойных проводящих изделий : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.250 "Контрольно-вимірювальна техніка" / Герасимов В. Г. – М., 1970. – 45 с.

33. Останин Ю. Я. Контроль многослойных изделий методом вихревых токов при помощи накладного датчика : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.250 "Контрольно-вимірювальна техніка" / Останин Ю. Я. – М., 1970. – 21 с.

34. Van Drunen G. Recognizing limitations in eddy-current testing / G. Van Drunen, V. S. Cecco // *NDT International*. – 1984. – Vol. 17. – P. 9–17.

35. Tian G. Y. Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT / G. Y. Tian, A. Sophian // *NDT & E International*. – 2005. – Vol. 38. – P. 319–324.

36. Локшина Н. Н. Приближенная методика расчета накладных вихретоковых датчиков / Н. Н. Локшина, Ю. М. Шкарлет // *Дефектоскопия*. – 1970. – №1. – С. 41–45.

37. Клюев В. В. Контроль накладными и накладными-экранными вихретоковыми преобразователями движущихся изделий / В. В. Клюев, М. Л. Файнгойз. // *Дефектоскопия*. – 1974. – №1. – С. 18–24.

38. Клюев В. В. Контроль круглыми проходными вихретоковыми преобразователями движущихся ферромагнитных изделий / В. В. Клюев, М. Л. Файнгойз. // *Дефектоскопия*. – 1974. – №2. – С. 107–111.

39. Ершов Р. Е. Контроль термообработки ферромагнитных изделий методом вихревых токов / Р. Е. Ершов // *Известия ВУЗов*. – 1966. – №4. – С. 52–61.

40. Герасимов В. Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В. Г. Герасимов, В. В. Клюев, В. Е. Шатерников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.

41. Герасимов В. Г. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / В. Г. Герасимов, Ю. Я. Останин, А. Д. Покровский. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.

42. Алешин Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: Учебное пособие / Н. П. Алешин. – М: Машиностроение, 2006. – 368 с.

43. Inductive and capacitive array imaging of buried objects / D. Schlicker, A. Washabaugh, I. Shay, N. Goldfine // *Bindt Insight*. – 2006. – Vol. 48. – P. 302–306.

44. Electric Field Leakage Nondestructive Testing Principle and its Simulation / D. Li, Y. Sun, Z. Ye, Y. Kang // *Materials Evaluation*. – 2015. – Vol. 73. – Issue 11. – P. 1438–1445.

45. Non-destructive evaluation of adhesive layer using a planar array capacitive imaging technology / Y. Zhang, L. Zhao, Y. Wen, D. Sun // *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure*. – 2016. – Vol. 98. – P. 42–44.

46. Kuras O. The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface : Dipl.-Phys. / Kuras O. – Nottingham, 2002. – 308 p.

47. Blitz J. *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing (Second Edition)* / J. Blitz. – London: Chapman and Hall, 1997. – 44 p.

48. Герасимов В. Г. Неразрушающий контроль / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с. – (Электромагнитный контроль).

49. Matiss I. Multi-element capacitive sensor for non-destructive measurement of the dielectric permittivity and thickness of dielectric plates and shells / I. Matiss // *NDT & E International*. – 2014. – Vol. 66. – P. 99–105.

50. Pinilla O. R. New Experimental Method for Measuring the Dynamic Behavior of the Average Density of Human Cell Membrane / O. R. Pinilla, J. C. Salgado // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2016. – Vol. 11. – N5. – P. 3427–3429.

51. Roloff B. Indentation recovery threshold using the Electrostatic Detection Apparatus / B. Roloff, B. Offa, I. J. Turner // Canadian Society of Forensic Science Journal. – 2017. – №50. – P. 23–29.

52. Capacitive Sensing for Nuclear Power Plant Cable Insulation Assessment / N. Bowler, S. Liu, M. I. Byler, L. S. Fifield // Iowa State University Conference Proceeding. – 2016. – N1. – P. 177–178.

53. Investigation of Dynamic Properties of a Novel Capacitive-based Sensing Skin for Nondestructive Testing / [H. Saleem, A. Downey, S. Laflamme and et al.] // Materials Evaluation. – 2015. – Vol. 73. – Issue 10. – P. 1384–1391.

54. Non-destructive evaluation of an infusion process using capacitive sensing technique / [Y. Yang, T. Vervust, F. Bossuyt and et al.] // Emerging Technologies in Non-Destructive Testing VI. – 2016. – N1. – P. 293–297.

55. Non-destructive and wireless monitoring of biodegradable polymers / [T. Salpavaara, A. Hanninen, A. Antniemi and et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2017. – Vol. 251. – P. 1018–1025.

56. Мак-Мастер Р. Неразрушающие испытания. Справочник / Р. Мак-Мастер. – М.: Энергия, 1965. – 504 с.

57. George B. Advances in Capacitive, Eddy Current and Magnetic Displacement Sensors and Corresponding Interfaces / B. George, Z. Tan, S. Nihtianov // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Issue 99.

58. Валитов А. М. Приборы и методы контроля толщины покрытий. Справочное пособие / А. М. Валитов, Г. И. Шилов. – Л.: Машиностроение, 1970. – 120 с.

59. Kenneth J. E. Void fraction measurements in gas - liquid flows using capacitance sensors / J. E. Kenneth, S. R. Kamiel // Measurement Science and Technology. – 1996. – Vol. 7. – N8. – P. 43–53.

60. Development of a capacitive sensor for concrete structure health monitoring / [Y. Cheng, F. Gao, A. Hanif and et al.] // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 149. – P. 659–668.

61. Transparent capacitive sensor for structural health monitoring applications / [N. Na, Z. Ling, W. Yin and et al.]. // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2016. – Vol. 52. – Issue 3-4. – P. 1577–1584.

62. Liu Z. Experimenting capacitive sensing technique for structural integrity assessment / Z. Liu, H. Liu // Industrial Technology 2017 IEEE International Conference. – 2017. – P. 922–927.

63. Goldshtein A. E. An electro-capacitive measuring transducer for the process inspection of the cable capacitance per unit length in the process of production / A. E. Goldshtein, G. V. Vavilova, V. Y. Belyankov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51. – Issue 2. – P. 86–93.

64. Preliminary studies on the design principles of capacitive imaging probes for non-destructive evaluation / X. Yin, D. A. Hutchins, G. Chen, W. Li // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2013. – Vol. 42. – N3. – P. 447–470.

65. Соболев В. С. Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.

66. Morozov M. Capacitive imaging of impact damage in composite material / M. Morozov, W. Jackson, S. G. Pierce // Composites Part B: Engineering. – 2017. – Vol. 113. – P. 65–71.

67. Матис И. Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля / И. Г. Матис. – Рига: Зинавтне, 1982. – 302 с.

68. Baxter L. K. Capacitive Sensors: Design and Applications / L. K. Baxter. – New York: Wiley-IEEE Press, 1996. – 320 p.

69. Stuart A. Transducers: Theory and Applications / A. Stuart, J. A. Allocca – Reston: Reston Pub Co, 1984. – 497 p.

70. Беда П. И. Исследование сигнала накладного датчика в зависимости от изменения размеров и расположения дефектов типа трещин / П. И. Беда // Дефектоскопия. – 1970. – №1. – С. 62–67.

71. Tang R. Cable insulation detection based on coplanar capacitive sensor / R. Tang, Y. Huang // Automation, 2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association. – 2017.
72. Schinziger R. Conformal mapping: methods and applications / R. Schinziger, A. A. Laura. – Amsterdam: Elsevier, 1991. – 624 p.
73. Vendik O. Modeling and calculation of the capacitance of a planar capacitor containing a ferroelectric thin film / O. Vendik, S. Zubko, M. Nikol'skii // Technical Physics. – 1999. – Vol. 44. – P. 349–355.
74. Electrostatic analysis of a comb-finger actuator with Schwarz-Christoffel conformal mapping / [P. Bruschi, A. Nannini, F. Pieri and et al.] // Sensors and Actuators A: Physical. – 2004. – Vol. 113. – P. 106–117.
75. Igreja R. Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure / R. Igreja, C. J. Dias // Sensors and Actuators A: Physical. – 2004. – Vol. 112. – P. 291–301.
76. Aditya B. An Analytical Fringe Capacitance Model for Interconnects Using Conformal Mapping / B. Aditya, C. P. Bipul, R. Kaushik // Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions. – 2006. – Vol. 25. – P. 2765–2774.
77. Bergmanis K. A. Calculation of the electric field of a capacitor with a cylindrical dielectric / K. A. Bergmanis, I. G. Matis // Mechanics of Composite Materials. – 1971. – Vol. 7. – P. 461–464.
78. Chiang C. T. A Semi-Cylindrical Capacitive Sensor with Signal Conditioner for Flow Meter Applications / C. T. Chiang, Y. C. Huang // Sensors IEEE Conference. – 2006. – N5. – P. 1139–1142.
79. A general conformal-mapping approach to the optimum electrode design of coplanar waveguides with arbitrary cross section / [M. Goano, F. Bertazzi, P. Caravelli and et al.] // Microwave Theory and Techniques. – 2001. – Vol. 49. – P. 1573–1580.

80. Chen T. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multi-layered dielectric structures / T. Chen, N. Bowler // *Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2010. – Vol. 17. – P. 1307–1318.

81. Bai E. W. Capacitors and the method of moments / E. W. Bai, K. E. Lonngren. // *Computers & Electrical Engineering*. – 2004. – Vol. 30. – P. 223–229.

82. Huang Y. Optimization of the coplanar interdigital capacitive sensor / Y. Huang, Z. Zhan, N. Bowler // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1806. – P. 171–179.

83. Report of BCC Research // *Nanomaterials. Global Nanomaterials Markets*. May 2013. — 250 p.

84. Asian Technology Information Program (ATIP). *Nanotechnology in Asia 2003*. Tokyo (JP):ATIP. — 2013. — 19 p.

85. Bins & Associates. *Nanocomposites Market Opportunities*. Sheboygan (US): Bins & Associates. — 2014. — 640 p.

86. *Nanotechnology*. San Jose (US) : Global Industry Analysts. — 2013. — 597 p.

87. Report of United States National Science Foundation // *National Nanotechnology Initiative*. — Washington, D.C. — September 2015. — 38 p.

88. Diamond, G. G. A New Capacitive Imaging Technique for NDT [Text] / G. G. Diamond, D. A. Hutchins // *Eur. Conf. NDT, Berlin, Germany*. – 2006. – Poster 229.

89. Diamond, G. G. Electrostatic-capacitive imaging: a new NDE technique [Text] / G. G. Diamond, D. A. Hutchins, K. K. Leong, T. H. Gan // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. – 2007. – Vol. 894. – P. 689–694.

90. Suh Nam P. An electrostatic charge decay technique for nondestructive evaluation of nonmetallic materials [Text] / Suh Nam P., Tse Ming-Kai // *Int. Adv. Nondestruct. Test*. – 1983. – Vol. 9. – P. 192–226.

91. Wen, J. Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement / J. Wen, Z. Xia, F. Choy // *Composites Part B: Engineering*. – 2011. – Vol. 42. – P. 77–86.

92. Experimental study on NDT method using electromagnetic waves / T. Shibata, H. Hashizume, S. Kitajima, K. Ogura // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – №161. – С. 348–352.

93. Protasov A. G. Multilayer thin film sensors for damage diagnostics [Text] / A. G. Protasov, Y. G. Gordienko, E. E. Zasimchuk // *AIP Conference Proceedings*. – 2006. – Vol. 820. – Issue 1. – P. 930–937.

94. Goldshtein A. E. An electro-capacitive measuring transducer for the process inspection of the cable capacitance per unit length in the process of production / A. E. Goldshtein, G. V. Vavilova, V. Y. Belyankov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2015. – Vol. 51. – Issue 2. – P. 86–93.

95. Goldshtein A. Capacitance Control on the Wire Production Line / A. Goldshtein, G. Vavilova, S. Mazikov // *VII Scientific Conference with International Participation “Information-Measuring Equipment and Technologies”*. – 2016. – Vol. 79. – P. 1–8.

96. Kondovych S. Nondestructive method of thin-film dielectric constant measurements by two-wire capacitor / S. Kondovych, I. Luk'yanchuk // *Physica Status Solidi*. – 2016. – Vol. 254. – Issue 4. – P. 1–5.

97. Електростатичний метод неруйнівного контролю матеріалів / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов // *Матеріали IV науково-практичної конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання»*. — Івано-Франківськ.: ІФНТУНГ, 2013. — С. 60—61.

98. Аналіз електростатичного методу неруйнівного контролю для різних типів структур матеріалів / Д.К. Івіцька, В.Г. Баженов // *Матеріали 5-ї науково-технічної конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій”*. – 2016. – С. 210 – 211.

99. Jackson J. D. Classical Electrodynamics, Third edition / J. D. Jackson. – New York: Wiley, 1999. – 832 p.
100. Larsson J. Electromagnetics from a quasistatic perspective / J. Larsson // American Journal of Physics. – 2007. – Vol. 75. – P. 230–239.
101. Amenabar I. In Introductory Review to THz Non-Destructive Testing of Composite Mater / I. Amenabar, F. Lopez, A. Mendikute // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2013. – Vol. 34. – Issue 2. – P. 152–169.
102. Novel capacitive proximity sensors for assessing the aging of composite insulators / J. Jiao, L. Li, B. Wu, C. He // Sensors and Actuators A: Physical. – 2017. – Vol. 253. – P. 75–84.
103. Jonscher A. K. Dielectric relaxation in solids / A. K. Jonscher. – London: Chelsea Dielectric Press, 1983. – 380 p.
104. Böttcher C. J. Theory of electric polarization / C. J. Böttcher. – New York: Elsevier Scientific Pub, 1973. – 378 p.
105. Raju G. G. Dielectrics in Electric Fields / G. G. Raju. – Florida: CRC Press, 2003. – 776 p.
106. Sheldon R. T. An Interdigital Capacitive Sensor for Nondestructive Evaluation of Wire Insulation / R. T. Sheldon, N. Bowler // IEEE Sensors Journal. – 2014. – Vol. 14. – Issue 4. – P. 961–970.
107. Fano R. M. Electromagnetic Fields, Energy, and Forces / R. M. Fano, R. B. Adler, L. J. Chu. – New York: John Wiley & Sons, 1960. – 520 p.
108. Nassr A. A. Non-destructive evaluation of laminated composite plates using dielectrometry sensors / A. A. Nassr, W. W. El-Dakhakhni // Smart Materials and Structures. – 2009. – Vol. 18. – N5. – P. 55–63.
109. Nassr A. A. Coplanar capacitance sensors for detecting water intrusion in composite structures / A. A. Nassr, W. H. Ahmed, W. W. El-Dakhakhni // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19. – N7. – P. 72–75.

110. Lucas J. Analytical capacitive sensor sensitivity distribution and applications / J. Lucas, S. Hole, C. Batis // *Measurement Science and Technology*. – 2006. – Vol. 17. – P. 2467–2478.

111. Jaworek A. Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow / A. Jaworek, A. Krupa // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2010. – Vol. 160. – P. 78–86.

112. Uncertainty in multiple penetration depth fringing electric field sensor measurements / A. V. Mamishev, S. R. Cantrell, Y. Du, B. C. Lesieutre, M. Zahn // *Instrumentation and Measurement*. – 2002. – Vol. 51. – P. 1192–1199.

113. Characterization of capacitive array for NDE applications / [P. J. Shull, A. V. Clark, P. R. Heyliger and et al.] // *Research in Nondestructive Evaluation*. – 1990. – Vol. 2. – P. 11–27.

114. Capacitive probe array measurement and limitations / B. A. Auld, A. V. Clark, S. R. Schaps, P. R. Heyliger // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. – 1993. – Vol. 12. – P. 1063–1070.

115. Characterizing surface features on conducting specimens through an insulation layer using the capacitive imaging technique / [Z. Li, X. Yin, A. Yan and et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1706. – Issue 1.

116. Bazhenov V. G. Mathematical Model Electro Capacitive Methods of Nondestructive Testing / V. G. Bazhenov, I. I. Ivitskiy, D. K. Ivitska // *SWorld Journal*. — 2017. — Issue 13. — P. 185—189.

117. Первичные преобразователи для реализации электростатического метода неразрушающего контроля изделий / В. Г. Баженов, Д. К. Ивицкая // *Материалы 8-й Международной научно-технической конференции “Приборостроение - 2015”*. – 2015. – С. 47 - 48.

118. Особливості реалізації електростатичного амплітудно-фазового способу неруйнівного контролю / В.Г. Баженов, Д.К. Івіцька // *Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”*. – Київ: НТУУ “КПІ ім. І.Сікорського”, 2017. – С. 135.

119. Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений / Г. А. Гринберг. – М.: Изд. АН СССР, 1948. – 727 с.

120. Shay I. C. Cylindrical geometry electroquasistatic dielectrometry sensors / I. C. Shay, M. Zahn // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2005. – Vol. 12. – N1. – P. 41–49.

121. Musa S. M. Using finite element method to calculate capacitance, inductance, characteristic impedance of open microstrip lines / S. M. Musa, M. N. Sadiku // Microwave and Optical Technology Letters. – 2008. – Vol. 50. – P. 611–614.

122. Determining the permittivity profile inside reinforced concrete using capacitive probes / [M. Fares, Y. Fargier, G. Villain and et al.] // NDT & E International. – 2016. – Vol. 79. – P. 150–161.

123. Bolvin H. Three-dimensional numerical modeling of a capacitance probe: Application to measurement interpretation / H. Bolvin, A. Chambarel, A. Chanzy // Soil Science Society of America. – 2004. – Vol. 68. – P. 440–446.

124. Optimum design of segmented capacitance sensing array for multi-phase interface measurement / H.Wang, W. Yin, W. Yang, M. S. Beck // Measurement Science and Technology. – 1996. – Vol. 7. – N1. – P. 79–86.

125. Gimple M. Variable geometry capacitive probes for multipurpose sensing / M. Gimple, B. A. Auld // Research in Nondestructive Evaluation. – 1989. – Vol. 1. – P. 111–132.

126. Yin X. Capacitive Imaging Technique For Nondestructive Evaluation: Ph.D. in Engineering / Yin X. – Warwick, 2011. – 264 p.

127. Lucas J. Simple and direct calculation of capacitive sensor sensitivity map / J. Lucas, S. Hole, C. Batis // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2008. – Vol. 27. – P. 307–318.

128. Xiaohui H. Planar capacitive sensors -Designs and Applications / H. Xiaohui, W. Yang // *Sensors Review*. – 2010. – Vol. 30. – P. 24–39.

129. Design of capacitance electrodes for concentration measurement of two-phase flow / C. G.Xie, A. L. Stott, A. Plaskowski, M. S. Beck // *Measurement Science and Technology*. – 1990. – Vol. 1. – P. 65–78.

130. Sabet M. Mechanical and electrical properties of low density polyethylene filled with carbon nanotubes / M. Sabet, H. Soleimani // *2nd International Conference on Structural Nano Composites*. – 2014. – N 64. – P. 1–8.

131. Simulation of nanomodified polymers testing by the electric capacitive method / V. Bazhenov, A. Protasov, I. Ivitskiy, D. Ivitska // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. — Vol. 4. — №5(88). — P. 4—9.

132. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material / I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. — Vol. 1. — №5(85). — P. 4—9.

133. Комп'ютерне моделювання ємнісного давача для неруйнівного контролю / Д.К. Івіцька, В.Г. Баженов // *Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем»*. — 2016. — С. 35—38.

134. Моделювання ємнісного давача складної форми / В.Г. Баженов, Д.К. Івіцька // *Матеріали 3-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції “Актуальні проблеми автоматики та приладобудування”*. – 2016. – С. 92—93.

135. Transducers for realization of the electrostatic method of non-destructive testing of functional polymers / V. Bazhenov, D. Ivitska, I. I. Ivitskiy // *NDT DAYS 2017*. — Sozopol, 2017. — P. 128—129.

136. Connor S. EPIC: A New Epoch in Electric Potential Sensing [Електронний ресурс] / S. Connor. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.sensorsmag.com/embedded/epic-a-new-epoch-electric-potential-sensing>.

137. Wilson J. W. 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterisation / J. W. Wilson, G. Y. Tian // *Insight*. – 2006. – №48. – С. 357–359.

138. Пат. на винахід 107893 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201315068; заявл. 23.12.13; опубл. 25.02.15, Бюл. №4.

139. Пат. на винахід 109357 Україна, МПК G 01 B 7/00, G 01 N 27/22. Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201404947; заявл. 12.05.14; опубл. 10.08.15, Бюл. №15.

140. Пат. на винахід 112917 Україна, МПК G 01 B 7/00, G 01 B 7/287, G 01 N 27/22. Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №a201502540; заявл. 20.03.15; опубл. 10.11.16, Бюл. №21.

141. Пат. 90117 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201315066; заявл. 23.12.13; опубл. 12.05.14, Бюл. №9.

142. Пат. 93032 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201404948; заявл. 12.05.14; опубл. 10.09.14, Бюл. №17.

143. Пат. 101625 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201502542; заявл. 20.03.15; опубл. 25.09.15, Бюл. №18.

144. Баженов В. Г. Удосконалений електростатичний метод неруйнівного контролю / В. Г. Баженов, Д. К. Івіцька, С. В. Грузін // Методи та прилади контролю якості. — 2013. — №2(31). — С. 26—28.

145. Івіцька Д. К. Розробка електростатичного методу неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю / Д. К. Івіцька // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — №3(19). — С. 44—47.

146. Баженов В. Г. Експериментальне дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів у полімерних матеріалах / В. Г. Баженов, І. І. Івіцький, Д. К. Івіцька // Вісник НТУ «ХП». — 2017. — №16. — С. 34—39.

147. Електростатичний амплітудно-фазовий метод неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю / В. Г. Баженов, Д. К. Івіцька // Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції та виставки “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. — 2016.

148. Контроль товщини пакувальної плівки електростатичним методом / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов, І. І. Івіцький // Матеріали доповідей XVI Науково-практичної конференції молодих вчених «Новітні технології пакування». — К.: НУХТ, 2017. — С. 7—9.

149. Електростатичний контроль глибини введення металевих елементів у діелектричні матеріали / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». — Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2017. — С. 87—88.

150. Босый В. В. Инженерные методы расчета погрешностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен» и «Техническая термодинамика» / В. В. Босый, Г. Н. Васильченко, Е. Н. Панов. — Киев, 1985. — 72 с.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

ТОВ «НВФ Діагностичні прилади»



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Івіцької Дар'ї Костянтинівни
«Вдосконалення електроємнісного методу контролю
для дефектоскопії матеріалів»

Цим актом представники ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» в особах заступника директора ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» Козіна О.М., інженера ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» Павлія А.І., інженера ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» Комарова Д.В., підтверджуємо, що результати науково-технічних розробок за темою дисертації Івіцької Дар'ї Костянтинівни «Вдосконалення електроємнісного методу контролю для дефектоскопії матеріалів», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, використовуються у виробничому процесі ТОВ «НВФ Діагностичні прилади».

Отримані у дисертаційній роботі аналітичні вирази дозволяють здійснювати розрахунок електроємнісних сенсорів, що використовуються для дефектоскопів, які розроблюються на підприємстві, тим самим зменшуючи час, необхідний на попередній розрахунок.

Проведене дослідження впливу геометричної форми сенсора на його чутливість, що здійснювалося за допомогою 3D моделювання, дозволило встановити оптимальну геометричну форму електроємнісних сенсорів, яку застосовано при їх виробництві. Дана форма сенсора дозволила збільшити максимальну глибину контролю та точність знаходження дефектів.

Крім того, створені у дисертаційній роботі 3D моделі сенсорів дозволяють здійснювати імітаційне моделювання знаходження дефектів у зразках з різними властивостями без необхідності проведення натурних експериментів. Це значно зменшує час введення у експлуатацію та дозволяє визначати експлуатаційні характеристики нових зразків дефектоскопів, що розроблюються у ТОВ «НВФ Діагностичні прилади», на етапі проектування.

Заступник директора

Козін О.М.

Інженер

Павлій А.І.

Інженер

Комаров Д.В.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан приладобудівного
факультету

Національного технічного
Університету України

«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,

д.т.н., проф.

 Г. С. Тимчик

«__» _____ 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Івіцької Дар'ї Костянтинівни
«Вдосконалення електроємнісного методу контролю для дефектоскопії
матеріалів», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Цим актом засвідчується, що результати дисертаційної роботи здобувача кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Івіцької Дар'ї Костянтинівни, яка закінчила аспірантуру КПІ ім. Ігоря Сікорського у 2018 році, «Вдосконалення електроємнісного методу контролю для дефектоскопії матеріалів», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, використовуються в навчальному процесі під час проведення лекційних, практичних, лабораторних та індивідуальних занять, виконання курсових проектів і робіт з дисциплін «Електромагнітні методи неруйнівного контролю» та «Проектування систем технічної та медичної діагностики», а також під час виконання дипломного проектування на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Заступник декана ПБФ
з навчально-методичної роботи,
к.т.н., доцент



М. В. Філіппова

Завідувач кафедри ПСНК,
д.п.н., к.т.н., професор



А. Г. Протасов

Доцент кафедри ПСНК,
к.т.н., доцент



Р. М. Галаган

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Баженов В. Г. Удосконалений електростатичний метод неруйнівного контролю / В. Г. Баженов, Д. К. Івіцька, С. В. Грузін // Методи та прилади контролю якості. — 2013. — №2(31). — С. 26—28.

Здобувачем проведено моделювання методу в середовищі COMSOL Multiphysics.

2. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material / I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol. 1. — №5(85). — Р. 4—9. (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

Здобувачем проведено математичне моделювання контролю глибини введення інтелектуальних датчиків.

3. Simulation of nanomodified polymers testing by the electric capacitive method / V. Bazhenov, A. Protasov, I. Ivitskiy, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol. 4. — №5(88). — Р. 4—9. (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

Здобувачем проведено математичне моделювання контролю дефектів у наномодифікованих полімерних матеріалах.

4. Баженов В. Г. Експериментальне дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів у полімерних матеріалах / В. Г. Баженов, І. І. Івіцький, Д. К. Івіцька // Вісник НТУ «ХП». — 2017. — №16. — С. 34—39.

Здобувачем здійснено експериментальні дослідження.

5. Пат. на винахід 107893 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К.,

Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201315068; заявл. 23.12.13; опубл. 25.02.15, Бюл. №4.

Здобувачем запропоновано визначати вимірвальний сигнал як різницю вихідних сигналів двох пар електродів.

6. Пат. на винахід 109357 Україна, МПК G 01 B 7/00, G 01 N 27/22. Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201404947; заявл. 12.05.14; опубл. 10.08.15, Бюл. №15.

Здобувачем запропоновано одночасне виконання перемноження вимірвального сигналу з двома складовими ортогонального опорного сигналу.

7. Пат. на винахід 112917 Україна, МПК G 01 B 7/00, G 01 B 7/287, G 01 N 27/22. Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №a201502540; заявл. 20.03.15; опубл. 10.11.16, Бюл. №21.

Здобувачем запропоновано визначення значення фазового зсуву в кожній точці контролю по коду зміни початкової фази опорного сигналу, при якому буде мінімум амплітуди постійної складової.

8. Пат. на корисну модель 90117 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201315066; заявл. 23.12.13; опубл. 12.05.14, Бюл. №9.

Здобувачем запропоновано визначати вимірвальний сигнал як різницю вихідних сигналів однієї та другої пар електродів.

9. Пат. на корисну модель 93032 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201404948; заявл. 12.05.14; опубл. 10.09.14, Бюл. №17.

Здобувачем запропоновано одночасне виконання перемноження вимірювального сигналу з двома складовими ортогонального опорного сигналу.

10. Пат. на корисну модель 101625 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201502542; заявл. 20.03.15; опубл. 25.09.15, Бюл. №18.

Здобувачем запропоновано визначення значення фазового зсуву в кожній точці контролю по коду зміни початкової фази опорного сигналу, при якому буде мінімум амплітуди постійної складової.

11. Івіцька Д. К. Розробка електростатичного методу неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю / Д. К. Івіцька // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — №3(19). — С. 44—47. (входить до міжнародних наукометричних баз «Index Copernicus», «РИНЦ», «Ulrich's Periodicals Directory», «DRIVER», «BASE», «ResearchBib», «DOAJ», «WorldCat»).

12. Bazhenov V. G. Mathematical Model Electro Capacitive Methods of Nondestructive Testing / V. G. Bazhenov, I. I. Ivitskiy, D. K. Ivitska // SWorld Journal. — 2017. — Issue 13. — P. 185—189.

Здобувачем обґрунтовано застосування математичної моделі.

13. Електростатичний метод неруйнівного контролю матеріалів / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов // Матеріали IV науково-практичної конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. — С. 60—61.

Здобувачем обґрунтовано доцільність використання методу для контролю промислового обладнання.

14. Первичные преобразователи для реализации электростатического метода неразрушающего контроля изделий / В.Г.Баженов, Д. К. Ивицкая //

Материалы 8-й Международной научно-технической конференции “Приборостроение - 2015”. – 2015. – С. 47 - 48.

Здобувачем розраховані чутливості метода для різних типів дефектів.

15. Електростатичний амплітудно-фазовий метод неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю / В.Г. Баженов, Д.К. Івіцька // Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції та виставки “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. – Київ, 2016.

Здобувачем доведено підвищення завадостійкості при використанні методу.

16. Комп’ютерне моделювання ємнісного давача для неруйнівного контролю / Д.К. Івіцька, В.Г. Баженов // Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем». — 2016. — С. 35—38.

Здобувачем проведено комп’ютерне моделювання.

17. Моделювання ємнісного давача складної форми / В.Г. Баженов, Д.К. Івіцька // Матеріали 3-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції “Актуальні проблеми автоматики та приладобудування”. – 2016. – С. 92—93.

Здобувачем проведено комп’ютерне моделювання.

18. Аналіз електростатичного методу неруйнівного контролю для різних типів структур матеріалів / Д.К. Івіцька, В.Г. Баженов // Матеріали 5-ї науково-технічної конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій”. – 2016. – С. 210 – 211.

Здобувачем обґрунтовано можливість контролю матеріалів різної структури.

19. Контроль товщини пакувальної плівки електростатичним методом / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов, І. І. Івіцький // Матеріали доповідей XVI Науково-практичної конференції молодих вчених «Новітні технології пакування». — К.: НУХТ, 2017. — С. 7—9.

Здобувачем обґрунтовано необхідність застосування методу при контролі товщини плівки.

20. Електростатичний контроль глибини введення металевих елементів у діелектричні матеріали / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». — Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2017. — С. 87—88.

Здобувачем отримано розподіли електричного поля для різної глибини введення металевих елементів.

21. Transducers for realization of the electrostatic method of non-destructive testing of functional polymers / V. Bazhenov, D. Ivitska, I. I. Ivitskiy // NDT DAYS 2017. — Sozopol, 2017. — P. 128—129.

Здобувачем проведено математичне моделювання сенсорів різної форми.

22. Особливості реалізації електростатичного амплітудно-фазового способу неруйнівного контролю / В. Г. Баженов, Д. К. Івіцька // Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”. – Київ: НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. – С. 135.

Здобувачем запропоновано реалізацію амплітудно-фазового способу неруйнівного контролю.

ДОДАТОК В

Програмний код визначення випадкової похибки

```
clear;
% Характеристики сигналів
fp=3333; % робоча частота перетворювача
f_adc=1e+6; % частота дискретизації АЦП
td=1/f_adc; % час взяття однієї виборки
tinterp=1/(720*fp);
t=0:td:1/fp; % часовий інтервал
ti=0:tinterp:1/fp;
A1=4; A2=4; % амплітуда сигналів
A0=4/100;
phi=pi/2;
for i=1:10000
    x_izl=A1*cos(2*pi*fp*t);
    x_izm=A2*cos(2*pi*fp*t+phi)+A0*randn(1,length(t));
    x1=A1*sin(2*pi*fp*t);
    x2=A2*cos(2*pi*fp*t);
    % Характеристики АЦП
    n=12; %разрядність АЦП
    m=2^n; % кількість рівнів квантування
    xmax=5; xmin=-5; % діапазон сигналів
    D=xmax-xmin; % діапазон оцифровування
    Q=D/m; % крок квантування
    % значення квантованого сигналу при округленні
    x1kvokr=round(x1/Q)*Q;
    x2kvokr=round(x2/Q)*Q;
    plot(t,x1kvokr,t,x2kvokr);
```

```

grid;
ylim([-max(A1,A2)-0.1 max(A1,A2)+0.1]);
% значення квантованого сигналу при усіченні
x1kvus=floor(x1/Q)*Q;
x2kvus=floor(x2/Q)*Q;
figure;
plot(t,x1kvus,t,x2kvus);
grid;
ylim([-max(A1,A2)-0.1 max(A1,A2)+0.1]);
x_izmkvokr=round(x_izm/Q)*Q;
x_izlkvokr=round(x_izl/Q)*Q;
As1=sum(x_izmkvokr.*x1);
Ac1=sum(x_izmkvokr.*x2);
phi_res1=atan(Ac1/As1);
u_res1=sqrt((Ac1/301)^2+(As1/301)^2);
As2=sum(x_izlkvokr.*x1);
Ac2=sum(x_izlkvokr.*x2);
phi_res2=atan(Ac2/As2);
u_res2=sqrt((Ac2/301)^2+(As2/301)^2);
phi_res=phi_res1-phi_res2;
u_res=u_res1-u_res2;
phi_rad=phi*180/pi;
phi_res_rad=phi_res*180/pi;
sig_res1=x_izmkvokr.*x1;
sig_res2=x_izmkvokr.*x2;
results(i)=phi_res_rad;
results_u(i)=u_res;
end;
sredn=mean(results);

```

```

sredn_u=mean(results_u);
pogr=(results-sredn).^2;
pogr_u=(results_u-sredn_u).^2;
final_porg=sqrt(sum(pogr)/(10000-1));
final_porg_u=sqrt(sum(pogr_u)/(10000-1));
F_sig1=fft(sig_res1);
F_sig2=fft(sig_res2);
figure;
plot(abs(F_sig1));
hold on;
plot(abs(F_sig2),'r');
% Інтерполяція
xinterp_izm=interp1(t,x_izmkvokr,ti,'spline');
xinterp_izl=interp1(t,x_izlkvokr,ti,'spline');
As1=0;
for i=1:length(t)
    As1=As1+x_izmkvokr(i)*x1(i);
end
Ac1=0;
for i=1:length(t)
    Ac1=Ac1+x_izmkvokr(i)*x2(i);
end
As1=sum(xinterp_izm.*x1);
Ac1=sum(xinterp_izm.*x2);
phi_res1=atan(Ac1/As1);
As2=0;
for i=1:length(t)
    As2=As2+x_izlkvokr(i)*x1(i);
end

```

```

Ac2=0;
for i=1:length(t)
    Ac2=Ac2+x_izlkvokr(i)*x2(i);
end
As2=sum(xinterp_izl.*x1);
Ac2=sum(xinterp_izl.*x2);
phi_res2=atan(Ac2/As2);
phi_res=phi_res1-phi_res2;
phi_rad=phi*180/pi;
phi_res_rad=phi_res*180/pi;
sig_res1=xinterp_izm.*x1;
sig_res2=xinterp_izm.*x2;
figure;
plot(ti,x1,ti,x2,ti,xinterp_izm,ti,sig_res1,ti,sig_res2);
grid;

```